



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**NÁVRH KONŠTRUKČNÝCH ZMIEN PARNÉHO BUBNA
PRE VYŠŠÍ TLAK**

DESIGN OF MODIFICATIONS OF STEAM DRUM DESIGN FOR INCREASED PRESSURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Vince

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Nad', Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Tomáš Vince**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Nadř, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh konstrukčných zmien parného bubna pre vyšší tlak

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práca sa bude venovať kontrolnému a návrhovému výpočtu parného bubna kotla na základe platnej legislatívy. Náplňou je popis funkcie kotlového telesa v technológii výroby kyseliny dusičnej na prevádzke KD3 v Duslo, a.s. s ohľadom na získanie vstupných podmienok pre konstrukčné výpočty. Je nutné vykonať kontrolný výpočet existujúceho parného bubna a následne naň bude nadväzovať návrh modifikovanej konštrukcie zariadenia pre vyšší tlak.

Ciele bakalářské práce:

1. Základný popis kotlov.
2. Popis funkcie parného bubna.
3. Zoznámenie sa s platnou legislatívou.
4. Pevnostný výpočet parného bubna na modifikovaný skúšobný tlak.
5. Základná výkresová dokumentácia parného bubna.

Seznam doporučené literatury:

RAYAPROLU, Kumar. Boilers for power and process. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. ISBN 978--4200-7537-3.

ČERNÝ, Václav, JANEBA, Břetislav a TEYSSLER, Jiří. Parní kotle. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1983.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá kontrolným a návrhovým pevnostným výpočtom parného bubna priemyselného kotla na spaľovanie vzducho-čpavkovej zmesi. V úvode práce je spracovaná rešerš zameraná na priemyselné parné kotle, ďalej je bližšie popísaný predmetný kotol nachádzajúci sa na prevádzke na výrobu kyseliny dusičnej v chemickej spoločnosti DUSLO a. s., ktorého súčasťou je riešený parný bubon. Práca sa ďalej venuje významu a funkcii parného bubna a pomocou programu Virtual Vessel Design je uskutočnený kontrolný pevnostný výpočet podľa ČSN EN 13445. Výsledky výpočtu sú porovnané s výsledkami výpočtu podľa staršej nemeckej normy AD Merkblatt, na základe ktorej bol predmetný parný bubon pôvodne počítaný.

Kľúčové slová

parný bubon, parný kotol, žiarotrubný kotol, ČSN EN 13445, kontrolný pevnostný výpočet, návrhový pevnostný výpočet, Virtual Vessel Design

Abstract

This bachelor's thesis deals with control and design strength calculation of a steam drum of an industrial boiler for combustion of the air and ammonia mixture. Brief introduction to steam boilers is performed at the beginning of thesis, followed by more detailed description of a nitric acid plant steam boiler located in chemical company DUSLO a. s. Steam drum calculated in this thesis is part of the mentioned boiler. Importance and different functions of steam drum are subsequently explained and control strength calculation according to ČSN EN 13445 is performed using computing software Virtual Vessel Design. Calculation results are compared with results according to old German code AD Merkblatt, which was originally used for strength calculation of the steam drum in question.

Keywords

steam drum, steam boiler, flue tube boiler, ČSN EN 13445, strength calculation, structural design, Virtual Vessel Design

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VINCE, Tomáš. *Návrh konstrukčních změn parného bubna pre vyšší tlak*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117009>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Martin Nadř.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce Ing. Martina Naďa, Ph.D. a konzultantov Ing. Gabriela Zsilinszkého a Jána Drevenáka, za použitia odbornej literatúry a technických dokumentácií uvedených v zozname.

V Brne 22.5.2017

Tomáš Vince

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu svojej práce Ing. Martinovi Nad'ovi, Ph.D. a konzultantom Ing. Gabrielovi Zsilinszkému a Jánovi Drevenákovi za odborné vedenie pri vypracovávaní bakalárskej práce. Ďalej sa chcem poďakovať svojej rodine za podporu počas celého štúdia.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 10 |
| 1.1 | Popis kotla | 10 |
| 1.2 | Tepelné straty kotla | 10 |
| 1.3 | Rozdelenia kotlov | 11 |
| 1.4 | Ciele práce | 11 |
| 2 | Kotol na prevádzke výroby kyseliny dusičnej KD3 | 12 |
| 2.1 | Funkcia kotla v kontexte technológie výroby kyseliny dusičnej..... | 12 |
| 2.2 | Príprava vzducho-čpavkovej zmesi | 13 |
| 2.3 | Technológia výroby kyseliny dusičnej | 14 |
| 2.4 | Súčasti kotla..... | 16 |
| 2.4.1 | Ohrievač vzduchu..... | 16 |
| 2.4.2 | Spaľovacia komora a horák..... | 16 |
| 2.4.3 | Prehrievač pary..... | 18 |
| 2.4.4 | Parný bubon..... | 19 |
| 3 | Parný bubon | 20 |
| 3.1 | Funkcie parného bubna..... | 20 |
| 3.1.1 | Regulácia vodnej hladiny | 21 |
| 3.1.2 | Oddeľovanie zložiek parovodnej zmesi | 21 |
| 3.1.3 | Čistenie pary a vody | 22 |
| 3.2 | Veľkosť a umiestnenie parného bubna | 23 |
| 4 | Parný bubon na KD3..... | 25 |
| 4.1 | Stúpačky a spádové potrubie | 26 |
| 4.2 | Odvod pary | 26 |
| 4.3 | Prívod napájacej vody | 27 |
| 4.4 | Odkal'ovacie potrubie | 28 |
| 4.5 | Poistný ventil a odvzdušňovacie ventily | 28 |
| 5 | Platná európska legislatíva..... | 30 |
| 6 | Pevnostný výpočet | 31 |
| 6.1 | Kontrolný pevnostný výpočet..... | 31 |
| 6.2 | Návrhový pevnostný výpočet | 39 |
| 7 | Diskusia..... | 39 |
| | Záver..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Zoznam použitých zdrojov | 41 |
| Zoznam použitých obrázkov | 43 |
| Zoznam použitých tabuliek | 43 |
| Zoznam použitých značiek chemických prvkov a zlúčenín | 44 |
| Zoznam príloh | 45 |

1 Úvod

Parný kotol je zariadenie vyrábajúce tlakovú paru pre účely energetické, vykurovacie alebo technologické [1]. Parný bubon je nevyhnutná časť každého priemyselného kotla, kde plní niekoľko dôležitých funkcií ďalej popísaných v tejto práci.

Charakteristickými parametrami každého tlakového zariadenia sú tlak návrhový, prevádzkový a skúšobný. U parného kotla sa vykonáva tzv. tlaková skúška pevnosti, ktorá je vykonávaná hydraulicky. Počas skúšky sa kotol naplní vodou a natlakuje na predpísanú hodnotu skúšobného tlaku. Keďže kotol pozostáva z viacerých zariadení (parný bubon, trubkový zväzok, atď.), je možné, že jednotlivé zariadenia majú rozdielnu hodnotu predpísaného skúšobného tlaku. V takomto prípade sa počas tlakovej skúšky pevnosti dosahuje hodnota skúšobného tlaku komponenty s najnižšou predpísanou hodnotou.

V prípade parného kotla na prevádzke výroby kyseliny dusičnej v spoločnosti DUSLO a. s. má parný bubon predpísaný skúšobný pretlak 6,5 MPa, zatiaľ čo generátor pary (výmenníková časť s trubkovým zväzkom) má 7,6 MPa. Cieľom tejto práce je výpočtom podľa súčasne platnej normy pre tlakové nádoby potvrdiť, či by stávajúci parný bubon bolo z technického hľadiska možné natlakovať na skúšobný pretlak vyvíjajúca pary 7,6 MPa. V prípade, že to nie je možné, navrhnúť konštrukčné zmeny potrebné na zvýšenie pevnosti parného bubna.

Pravidlá prevádzky vyhradených technických zariadení nie sú v tejto práci zohľadnené. Možnosť zvýšiť hodnotu skúšobného tlaku je riešená výhradne z hľadiska technického, nie legislatívneho.

1.1 Popis kotla

V parnom kotle sa odohrávajú dva hlavné deje – *transformácia* chemickej energie na tepelnú a jej *prenos* do pracovného média a to v takom množstve, aby bol možný vznik pary o danom tlaku, teplote a prietoku, v závislosti od požadovaného výkonu kotla. Transformácia chemickej energie na tepelnú sa uskutočňuje horením. Pri tomto procese sa spaľovaním paliva uvoľňuje tepelná energia, ktorej nositeľom sú spaliny vznikajúce v ohnisku parného kotla. Prenos tejto tepelnej energie zo spalín do pracovného média, ktorým je vo väčšine prípadov voda sa uskutočňuje zväčša konvekciou vo výmenníkoch parného generátora. Pri prúdení vody a pary však vznikajú tlakové straty – dej je neizobarický, čím statický aj celkový tlak v parnom generátore postupne klesá. [1]

V obecnom prípade kotol pozostáva zo *spaľovacieho zariadenia* s príslušenstvom (napr. horáky, rošt, palivové hospodárstvo, ohnisko, vzduchové a sacie ventilátory či zariadenie na odvod tuhých zvyškov spaľovania) a z *parného generátoru*, resp. *výmenníkovej časti*. V parnom generátore sa uskutočňuje samotný ohrev vody, odparovanie a prehrievanie, prípadne znovu-prehrievanie pary. Všetky tieto procesy prebiehajú v jednotlivých zariadeniach, ktoré sú nevyhnutné pre správny chod kotla. Okrem týchto zariadení sa tu nachádza množstvo ďalších, ktoré slúžia na reguláciu, meranie a zabezpečovanie spoľahlivého a bezpečného chodu. [1]

1.2 Tepelné straty kotla

Pri spaľovaní tuhých palív sa obvykle uvažuje päť druhov tepelných strát [2]:

- a) *Strata horľavinou v pevných zvyškoch* sa vyskytuje pri spaľovaní tuhých palív, kedy zrná nezhoria úplne a časť uhlíku zostane v pevných zvyškoch a opúšťa s nimi ohnisko

- b) *Strata horľavinou v spalínach* vznikne pri nedostatku vzduchu alebo pri nedokonalom premiešaní paliva so vzduchom v priebehu spaľovania. V spalínach sa tak objavajú spáliteľné plyny, predovšetkým oxid uhoľnatý
- c) *Strata zdieľaním tepla do okolia*, tzv. strata sálaním a vedením je u moderných kotlov s dobrou izoláciou a oplechovaním malá a ďalej klesá s rastúcou veľkosťou kotla. U starších kotlov s ťažkou tehlovou stenou alebo čiernym oplechovaním sú tieto straty 1,3-krát až 2-krát vyššie.
- d) *Strata fyzickým teplom pevných zvyškov* je definovaná ako súčet strát v jednotlivých formách pevných zvyškov a jej hodnota nie je príliš veľká.
- e) *Strata citelným teplom spalín*, tzv. komínová strata daná rozdielom entalpií pri teplote výstupu spalín z kotla a pri teplote vzduchu vstupujúceho do kotla. Využitie tepla spalín bez straty je možné len v prípade, kedy by sa spaliny ochladili až na teplotu vzduchu vstupujúceho do kotla.

Pri návrhu kotla je snaha o minimalizáciu týchto strát, keďže sú nežiadúce. Straty a) a b) majú najvýznamnejší vplyv na celkovú hodnotu tepelných strát.

1.3 Rozdelenia kotlov

Kritériá, podľa ktorých možno rozdeliť kotle existuje niekoľko [3]:

a) Podľa média prúdiaceho trubkovým zväzkom :

- vodotrubné
- žiarotrubné
- kombinované

b) Podľa tlaku:

- nízkotlaké ($<2,5$ MPa)
- stredotlaké ($<6,4$ MPa)
- vysokotlaké ($<22,5$ MPa)
- s nadkritickým tlakom ($>22,5$ MPa)

c) Podľa využitia:

- priemyselné
- úžitkové
- lodné
- jadrové

1.4 Ciele práce

Cieľom tejto práce je základný popis priemyselného parného kotla a následne bližší popis kotla na spaľovanie plynného amoniaku so vzduchom. Ďalej popis významu a funkcie parného bubna, bližší popis riešeného parného bubna a kontrolný a návrhový pevnostný výpočet parného bubna podľa aktuálnej normy pre netopené tlakové nádoby ČSN EN 13445 [4]. Zhodnotenie výsledkov výpočtu a ich porovnanie s výsledkami podľa staršej normy AD Merkblatt [5]. Na záver vytvorenie základnej výkresovej dokumentácie parného bubna.

Práca sa ďalej venuje žiarotrubnému stredotlakému priemyselnému kotlu na spaľovanie plynného čpavku.

2 Kotel na prevádzke výroby kyseliny dusičnej KD3

Parný bubon skúmaný v tejto práci je súčasťou kotlového systému parného kotla na prevádzke výroby kyseliny dusičnej v chemickej firme DUSLO a. s. Tento podnik má v súčasnosti dve prevádzky na výrobu kyseliny dusičnej. Skúmaný kotol, ktorý možno vidieť na obrázku 1, sa nachádza na prevádzke Kyselina dusičná 3 (ďalej len „KD3“).



Obr. 1 - Parný kotol na KD3 (1 - parný bubon/kotlové teleso, 2 – generátor pary)

2.1 Funkcia kotla v kontexte technológie výroby kyseliny dusičnej

Kotol nachádzajúci sa na prevádzke KD3 je žiarotrubný kotol, čo znamená, že plyny horenia prúdia vo vnútri trubiek trubkového zväzku kotla. Palivom spaľovania je vzducho-čpavková zmes, ktorej produktom horenia sú oxidy dusíka, ktoré sú z technologického hľadiska nevyhnutné pre výrobu kyseliny dusičnej. Voda obklopujúca trubkový zväzok plní jednak chladiacu funkciu, ale jej ohrievaním sa taktiež využije teplo vzniknuté týmto technologickým spaľovaním a vzniká vodná para. Vodná para vyprodukovaná pri tomto procese sa z časti využíva na pohon parnej turbíny, ktorá ďalej poháňa kompresor, zvyšok je odvedený do závodného parovodného okruhu (viď. obrázok 2).

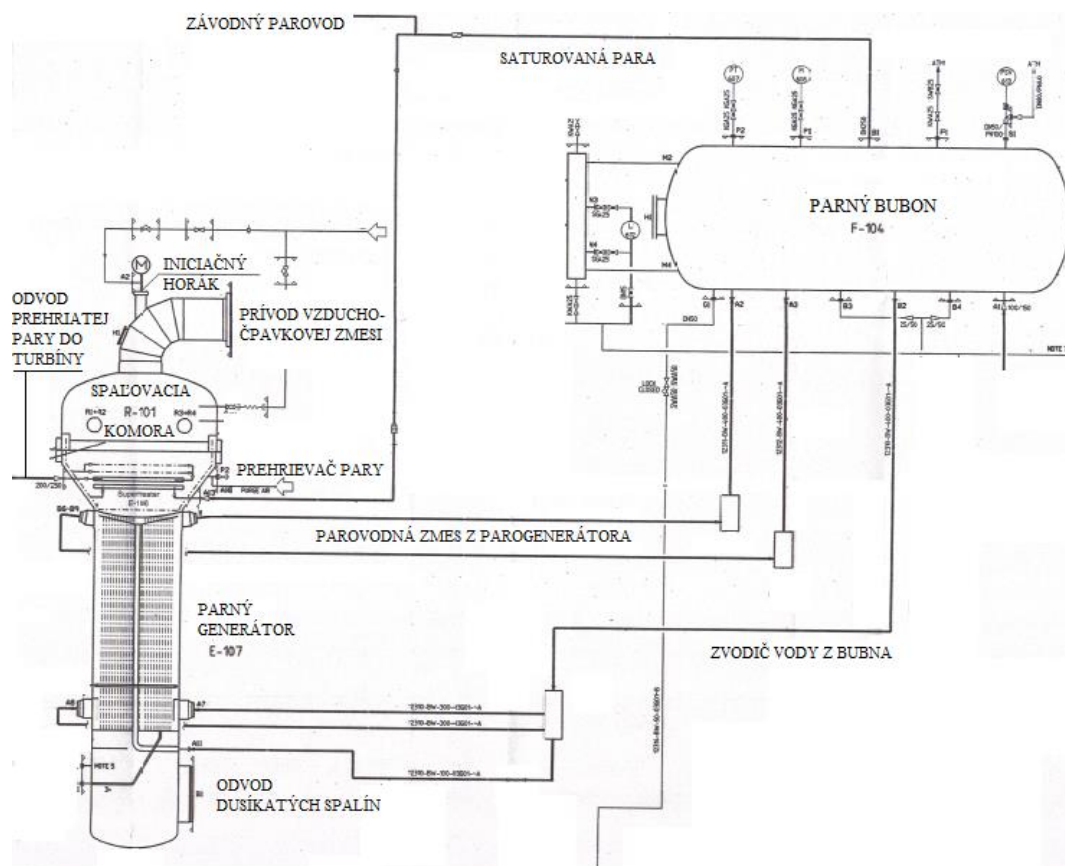
2.2 Príprava vzducho-čpavkovej zmesi

Ako surovina je používaný kvapalný čpavok a atmosférický vzduch [6]. Čpavok sa privádza z rozvodu vysokotlakého čpavku a pred vstupom do výparníka sa filtruje vo filtri, v ktorom je zbavený pevných nečistôt. Skrz regulačný ventil následne vstupuje do výparníku čpavku.

Vyparovanie prebieha pri tlaku 820 kPa a teplote 24 °C oteplenou chladiacou vodou, ktorá z kondenzátora odchádza dvomi paralelnými vetvami, pričom jedna ide cez výparník čpavku a druhá do vratného potrubia. V kvapalnom čpavku sa nachádza stopové množstvo vody (max 0,2%). Vzhľadom na príliš rozdielnu prchavosť medzi čpavkom a vodou pri tejto teplote môže dochádzať k postupnému hromadeniu vody vo výparníku. Preto je časť kvapalného čpavku odvádzaná z dna hlavného výparníka do pomocného výparníka čpavku. Tu dochádza k odpareniu zmesi amoniak a voda pri teplote 85 °C.

Plynný amoniak vystupujúci z výparníka prechádza cez prehrievač čpavku. Tu sa prehreje stredotlakou parou na 120 °C a prechádza do filtra plynného čpavku, kde sa odstránia pevné častice väčšie ako 3 µm. Atmosférický vzduch je nasávaný z okolia vzduchovým kompresorom. V izotermickom kompresore sa následne stlačí na požadovaný tlak 680 kPa.

Zmiešavanie prebieha v zmiešavači, kde sa v požadovanom pomere mieša plynný čpavok s primárnym vzduchom s miešacou účinnosťou 98 %. Normálna hodnota pomeru vzduch : čpavok je rovná 8,524, čomu zodpovedá koncentrácia 10,5 % čpavku v zmesi.



Obr. 2 – Schematický náčrt kotlového systému [7]

2.3 Technológia výroby kyseliny dusičnej

Proces výroby kyseliny dusičnej má päť hlavných stupňov [6]:

- 1) oxidácia amoniaku NH_3 vzdušným kyslíkom O_2 na NO
- 2) oxidácia NO na NO_2
- 3) absorpcia NO_2 vo vode za vzniku NH_3 a NO
- 4) opakovaná oxidácia NO a absorpcia NO_2 až po hlavu kolóny
- 5) selektívna redukcia NO_x plynov

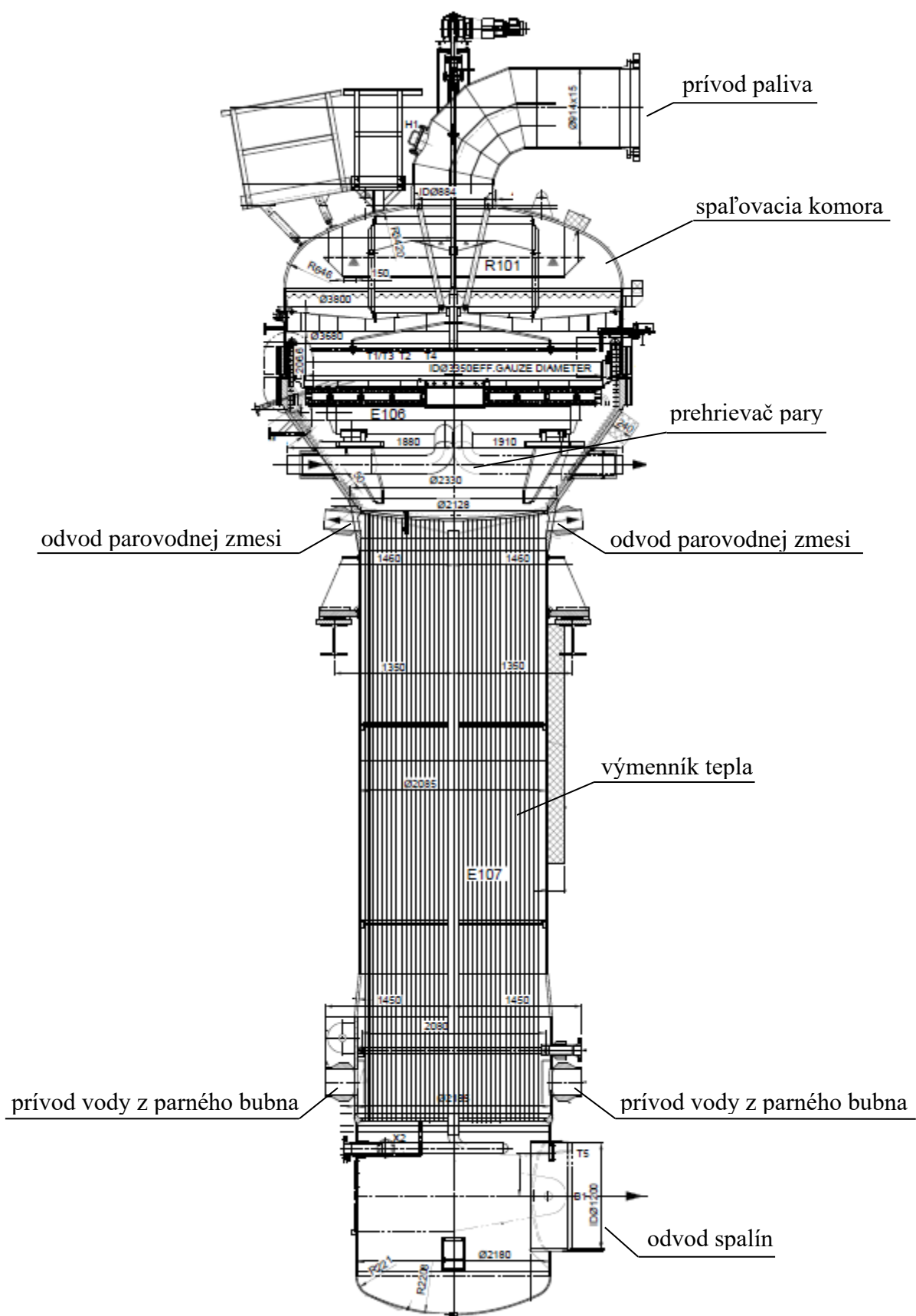
Stupne 1) až 3) prebiehajú v kotlovom systéme. Oxidácia amoniaku vzdušným kyslíkom prebieha v horáku (viď. obrázok Obr. 13). Reakcie prebiehajú na povrchu primárneho katalyzátora, ktorým sú platinovo ródiové sítá. Hlavným produktom reakcií je oxid dusnatý NO . Tieto chemické reakcie majú veľmi rýchly priebeh a vzhľadom na z toho vyplývajúce experimentálne problémy s odberom vzoriek možno len predpokladať, že katalytická reakcia prebieha v troch stupňoch, a to:

1. absorpcia O_2 na katalyzátor
2. vznik imidového radikálu ($\bullet\text{NH}$) na povrchu katalyzátora
3. reakcia O_2 s imidovým radikálom za vzniku NO a H_2O

Reakcia prebiehajúca v horáku prebieha pri teplote približne 920°C , pri ktorej je NO termodynamicky nestabilný, preto musí byť reakčná zmes rýchlo ochladená v kotlovom systéme umiestnenom lôžkom primárneho a sekundárneho katalyzátora. Pod primárnym katalyzátorom je uložený sekundárny katalyzátor, ktorý zabráňuje nežiadúcej oxidácii čpavku na N_2O . Použitím sekundárneho katalyzátora klesne produkcia skleníkového plynu N_2O , ktorý sa v prostredí výroby správa ako inert o viac ako 80%.

Vzducho-čpavková zmes vstupuje pri tlaku 658kPa do horáka čpavku, v ktorom prebiehajú súčasne dva deje. Na Pt-Rh katalytických sítach prebiehajú chemické reakcie, ktorých hlavným produktom je NO , ktorý sa ďalej oxiduje na NO_2 . Plyny sa reakčným teplom ohrejú na 920°C a vyvinuté teplo slúži na výrobu 42,4t/h pary o tlaku 4,4 MPa a prehriatej na teplotu 430°C , ktorá slúži čiastočne na pohon parnej turbíny a zbytok na export do rozvodu pary. Iniciácia oxidácie čpavku vzdušným kyslíkom prebieha pri nábehu výroby vodíkovým plameňom. Prívod vodíka sa odstaví akonáhle začnú prebiehať na Pt-Rh sítach reakcie. Primárny katalytický systém pozostáva okrem Pt-Rh sít aj z Pd sít uložených pod nimi. Pd sítá slúžia ako zachytávací systém úletov platiny z vrchných sít. Zachytávací systém platiny zachytí 50–80 % primárnych strát platiny, ktoré sú pre daný tlak, teplotu, zloženie a prietok relatívne vysoké. Priamo pod sitami primárneho katalyzátora je uložená vrstva katalyzátora Yara, ktorý slúži na potlačenie chemických reakcií, pri ktorých dochádza k vzniku skleníkového plynu N_2O .

Horúci reakčný plyn po prechode cez sítá primárneho katalyzátora a vrstvu sekundárneho katalyzátora prechádza cez trubky prehrievača pary a následne vstupuje do trubiek kotlového systému (viď. obrázok 3), v ktorom odovzdáva reakčné teplo. Chladenie steny v okolí prehrievača pary je zabezpečené vedľajším potrubím prehrievača pary. Cirkulácia kotlovej vody od parného bubna, resp. zberača pary cez vyparovače a znovu do zberača pary je zabezpečená prirodzenou cirkuláciou. Na ochranu vrchnej trubkovnice je privedený stredom vyparovača osobitný prúd vody. Kotlová voda prúdi v mimotrubkovom priestore a plyny v trúbkách, čo má veľkú výhodu v situácii, keď pri prasknutí jednej trubky nestrieka agresívna para na vedľajšie trubky. Pri ochladení reakčných plynov pod 500°C začína v obmedzenej miere vznikať aj NO_2 . Reakčný plyn sa ďalej ochladzuje v trúbkách vyparovača a kotlový systém opúšťa pri teplote 394°C . Účinnosť spaľovania čpavku je približne 95,5 %.



Obr. 3 - Schéma parného generátora na KD3 [8]

2.4 Súčasti kotla

Kotle sú komplexné zariadenia, ktoré na svoj správny chod potrebujú viacero dôležitých zariadení. Jednotlivé súčasti, ich počet a usporiadanie sa môžu líšiť v závislosti na type, funkcii alebo konštrukcii kotla. Jednotlivé zariadenia nemusia byť v kotle umiestnené vôbec alebo môžu byť nahradené iným (napríklad ohrievač vzduchu). Zariadenia popísané v nasledujúcich podkapitolách sú kľúčové a sú priamo súčasťou predmetného kotla na KD3.

2.4.1 Ohrievač vzduchu

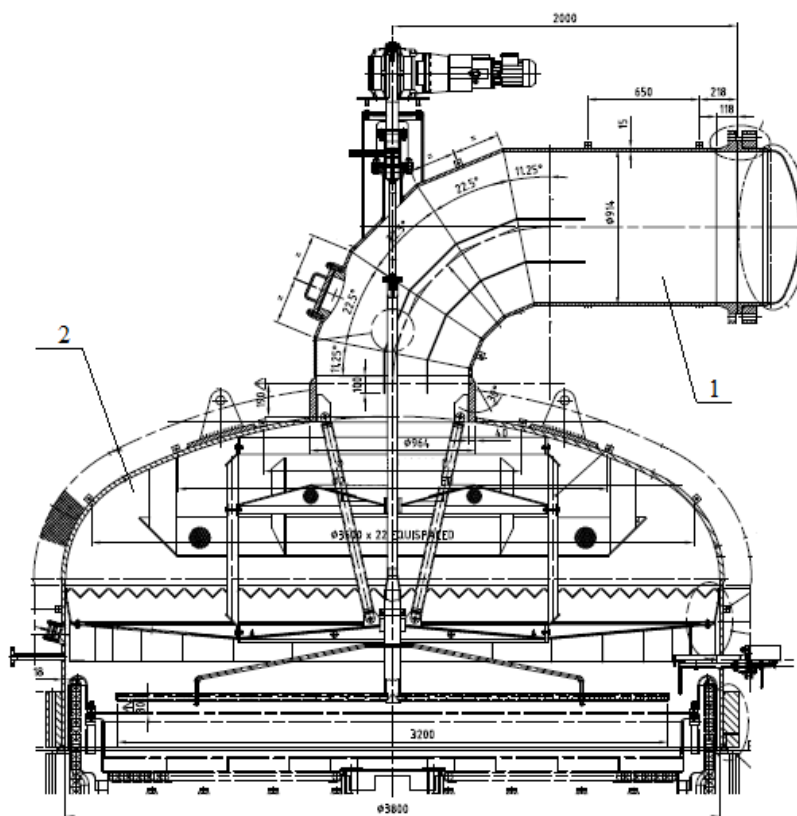
Ohrievač vzduchu je časť spaľovacieho zariadenia pre parný kotol dôležitá z dôvodu zmenšenia komínovej straty, lepšej iniciácie horenia paliva a zvýšenia spaľovacej teploty v ohnisku a celej teplotnej úrovne v kotle. Teplo sa získava zo spalín a je následne odovzdané čerstvému vzduchu na satí. Spaliny a čerstvý vzduch prúdia opačným smerom. Teplota, na ktorú sa vzduch ohrieva je daná požiadavkami spaľovacieho zariadenia, optimalizačnou analýzou investičných a prevádzkových nákladov a materiálovými možnosťami. Teplota nasávaného vzduchu nie je konštantná kvôli jej zmene v priebehu dňa či noci a v priebehu ročných období. Najnižšia prípustná teplota vzduchu vstupujúca do ohrievača je daná podmienkou, kedy teplota steny nesmie ležať v oblasti rosného bodu spalín. Teplotu na vstupe možno zvýšiť predohrevom vzduchu parou, recirkuláciou ohriateho vzduchu do satia vzduchového ventilátoru, prípadne použitím kaloriferu s pomocným teplonositeľom. [1, 9]

Vo všeobecnosti rozlišujeme ohrievače *rekuperačné* a *regeneračné*. U rekuperačného ohrievača teplo prechádza stenou, ktorá trvale oddeľuje obe prostredia. Sú zvyčajne tesné, majú väčšiu hmotnosť a väčší obostavaný priestor. Používané typy sú napríklad trubkové oceľové, trubkové sklenené, liatinové rebrové a pod. [1]

V regeneračnom ohrievači sa teplo prenáša pomocou zvláštneho člena, prípadne média, ktoré je striedavo ohrievané spalínami a ochladzované vzduchom, teda pracuje ako akumulátor tepla. Do skupiny regeneračných ohrievačov patria rotačné typu Ljungstroem a typu Rothemühle, prípadne „tepelné trubky“. [1]

2.4.2 Spaľovacia komora a horák

Spaľovacia komora, resp. ohnisko parného kotla je priestor vymedzený výhrevnými plochami, v ktorom sa priebežne spaľuje požadované množstvo paliva. Správne pracujúce ohnisko musí spĺňať niekoľko požiadaviek. Je potrebné zaistiť dokonalé priebežné spaľovanie privádzaného paliva, stabilita horenia musí byť dobrá rovnako pri stacionárnych, ako aj pri prechodových stavoch, predovšetkým v blízkosti minimálneho výkonu. Ďalej má mať ohnisko jednoduchú a účinnú reguláciu výkonu v čo najširšom rozmedzí. Spaľovacia komora (viď. obrázok 4) je exponovaná časť kotla, teda je vystavená najvyšším teplotám, preto sa kladie dôraz na použité materiály. Steny spaľovacej komory musia umožňovať vytvorenie potrebnej výhrevnej plochy k ochladeniu spalín, aby nebola prekročená teplota stien trubiek prehrievača, prípadne aby sa v ohnisku nevyskytovali mieste vysoké teploty. [1]



Obr. 4 – Náčrt spaľovacej komory kotla na KD3
(1 - prívod paliva, 2 - kryt spaľovacej komory) [10]



Obr. 5 - Spaľovacia komora kotla na KD3

Spaľovacia komora s vodíkovým horákom kotla na KD3 sa pozíčne nachádza nad parným generátorom a prehrievačom pary (viď. obrázok 3). Palivom privádzaným do spaľovacej komory je vzducho - čpavkováová zmes. Iniciácia horenia sa uskutočňuje pomocou plynného vodíku privedeného úzkym potrubím (viď. obrázok 6) do spaľovacej komory (viď. obrázky 5 a 6). Iniciačné zapálenie spustí chemickú reakciu a horenie ďalej prebieha samovoľne.

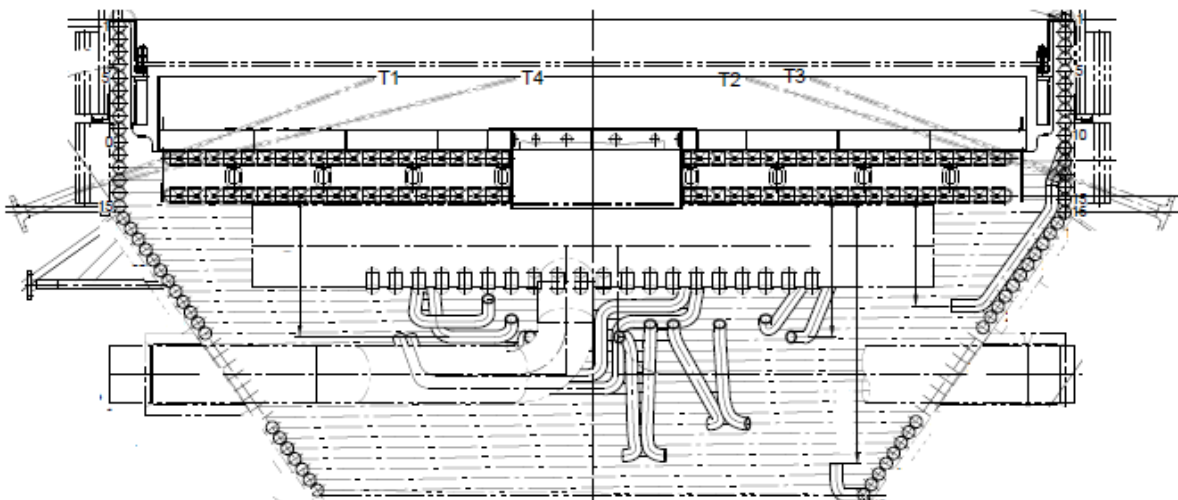


Obr. 6 - Detail spaľovacej komory kotla na KD3 (1 - prívod vodíka, 2 - prívod paliva)

Parné kotle na plynné palivo sú investične najmenej nákladné, majú najnižšiu spotrebu a najjednoduchšiu údržbu a reguláciu spaľovania. Ich spoľahlivosť je vysoká a ich prevádzku možno plne automatizovať, vrátane nabiehania i odstavovania. [1]

2.4.3 Prehrievač pary

Vyššiu energetickú účinnosť pary možno dosiahnuť zvýšením jej tlaku a teploty, čo sa uskutočňuje v prehrievači pary. Prehrievač pary je trubkový výmenník tepla s priečnym prietokom. Výrazne sa však odlišuje od konvenčných výmenníkov tepla. Charakteristickou črtou prehrievača pary je komplikované zabezpečenie prietoku a podstatne vyššie prevádzkové teploty ako u klasických výmenníkov tepla spôsobené vysokou teplotou spalín a prúdiacej pary. Vzhľadom na veľkú závislosť tepla vodnej pary na tlaku a teplote, prehrievač nemôže byť počítaný ako klasický tepelný výmenník použitím konvenčných metód výpočtu. Kvalitný návrh prehrievača pary je náročný aj z dôvodu komplexného prenosu tepla spalín radiáciou. U kotlov na tuhé palivo obsahujú spaliny vysoké množstvo trosky a popola, ktoré môžu spôsobiť zanášanie výhrevných plôch prehrievača. Pri návrhu prehrievača sa teda postupuje metódou, kedy sa jeho skutočná veľkosť určí na základe výstupnej teploty prehriatej pary. Ak je teplota prehriatej pary vyššia než požadovaná hodnota, potom je potrebné zmenšiť plochu výhrevného povrchu. Naopak, ak je teplota nižšia než požadovaná hodnota, je plochu je potrebné zväčšiť. [11]



Obr. 7 - Prehrievač pary v kotle na KD3 [12]

Keďže kotol na KD3 je kotol na plynné palivo, spaliny obsahujú minimálne množstvo nečistôt a nedochádza k zanášaniam povrchu trubiek. Prehrievač pary (viď. obrázok 7) je umiestnený medzi spaľovacou komorou a trubkovým zväzkom parogenerátora (viď. obrázok 3). Horúce plyny spaľovania prúdia okolo trubiek prehrievača a odovzdávajú svoje teplo nasýtenej pare prúdiacej z parného bubna vo vnútri trubiek prehrievača.

Prehrievač je výmenníkové zariadenie najviac exponované spomedzi ostatných kotlových súčastí. Jeho trubky dosahujú najvyššie teploty vyskytujúce sa v kotle a z tohto dôvodu vyžadujú maximálnu pozornosť ako pri návrhu, tak pri prevádzke. Druh ocele je potrebné zvoliť tak, aby sa predišlo prehrievaniu materiálu prehrievača. Podrobný výpočet teploty stien trubiek prehrievača je z tohto dôvodu kritický. Na základe známej hodnoty teploty stien trubiek naprieč celou dĺžkou prehrievača je možné zvoliť vhodný druh ocele. Vzhľadom na vysokú cenu legovaných ocelí, je každý stupeň prehrievača zvyčajne vyrobený z rôznej ocele. [11]

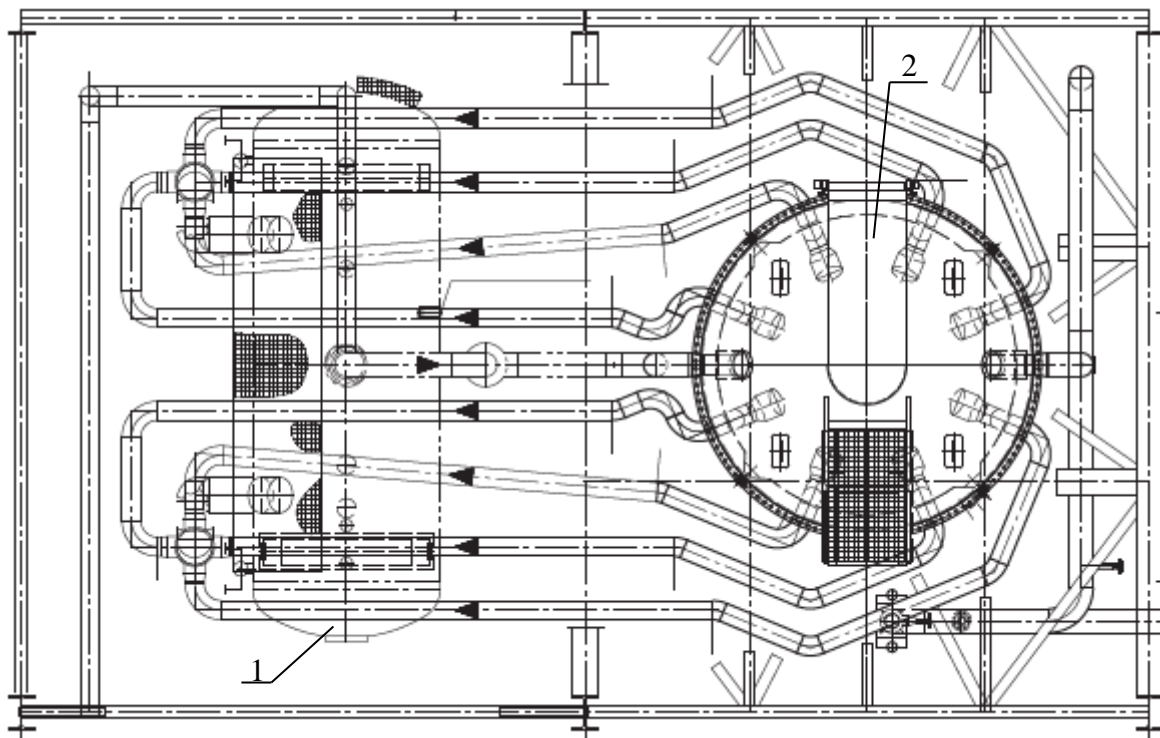
2.4.4 Parný bubon

Parný bubon (kotlové teleso), nazývaný aj zberač pary, je tlakové zariadenie napojené priamo na výmenníkovú časť parného generátora, odkiaľ prichádzajúca zmes pary a vody prúdi do parného bubna. V parnom bubne sa následne deje niekoľko pochodov bližšie popísaných v ďalšej kapitole.

3 Parný bubon

Parný bubon je tlakové zariadenie valcového tvaru, ktoré má dôležité postavenie v rámci produkcie pary v parnom kotli. Obvykle je to najhmotnejšia tlaková časť a rozloženie ostatných komponentov sa prispôbuje polohe parného bubna. Ako materiál na výrobu parného bubna sa zvyčajne používa oceľ s vysokým obsahom uhlíka a vysokou pevnosťou v ťahu. Z termodynamického hľadiska však nejde o zložité zariadenie, jedná sa len o vyrovnávaciu nádrž, ktorá má ale v kotlovom systéme viacero funkcií, medzi ktoré patrí regulácia množstva vody, oddeľovanie zložiek parovodnej zmesi alebo čistenie pary. [3, 13]

V minulosti mal parný bubon u veľkopriestorových kotlov funkciu výparnej plochy. Podľa hladiny sa regulovalo napájanie kotla, keďže tá tvorila rozhranie vodného a parného priestoru. U strmotrubných kotlov tvorí bubon spojovací prvok medzi varnicami a spádovými trúbkami a stráca tak funkciu výparnej plochy, keďže je umiestňovaný mimo ohnisko a prietahy (viď. obrázok 8). Staršie strmotrubné kotle obsahovali niekoľko bubnov, v súčasnosti sa aj z dôvodov ekonomických používa obvykle jeden. [1]



Obr. 8 - Potrubné vetvy parného bubna (1 – parný bubon, 2 – parogenerátor) [14]

3.1 Funkcie parného bubna

Medzi hlavné funkcie parného bubna patrí separovanie kvapalnej a plynnej časti parovodnej zmesi, s čím súvisí taktiež čistenie pary. Ďalej udržiavanie potrebného množstva vody a regulácia vodnej hladiny. Splnenie týchto funkcií je zabezpečované vnútornými zariadeniami bubna, tzv. zostavou. Zostava pozostáva primárne z oddeľovačov pary a zariadení na čistenie pary, ďalej je to potrubie pre distribúciu napájacej vody, chemické dávkovanie a odkal'ovacie potrubie [3].

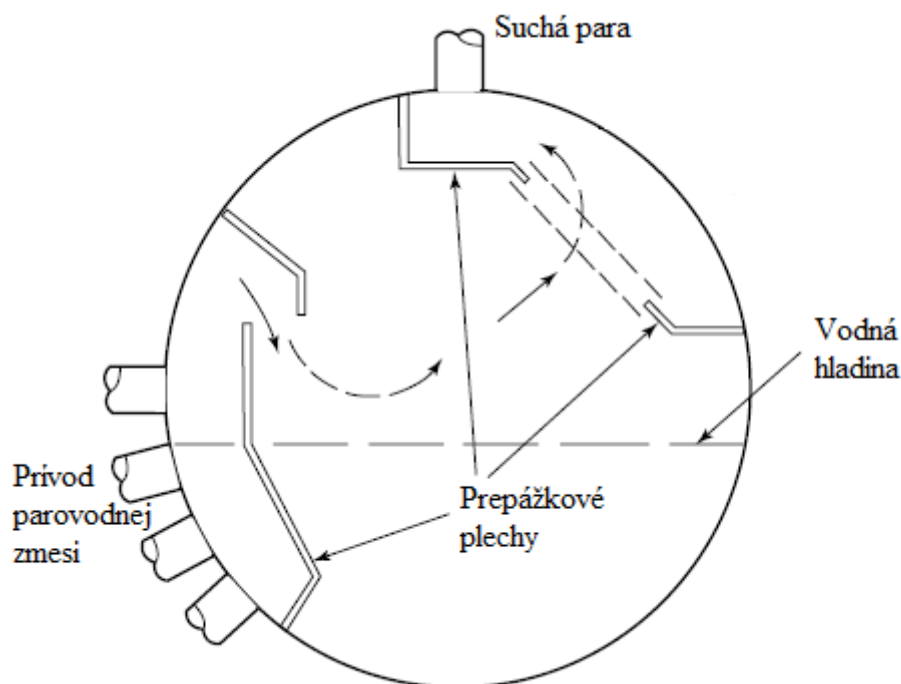
3.1.1 Regulácia vodnej hladiny

Jednou z najdôležitejších funkcií je udržiavanie stálej vodnej hladiny pri vyváženom a ustálenom prúde počas prevádzky. Hladina vody v bubne je jedným z najdôležitejších a najsledovanejších parametrov riadiaceho systému kotla. [3] Voda sa do parného bubna dopĺňa cez napájacie potrubie. Napájacia voda o nižšej teplote než je teplota vody v bubne, sa do bubnu privádza dvojitou trúbkou, aby medzi vodou a stenou valca bola izolačná medzera zaplnená parou. Takto sa zabráni tepelnému pnutiu plášt'a nádoby v mieste prívodu chladnejšej napájacej vody. [1] Napájacia voda sa privádza pod hladinu vody a perforovanou trúbkou je distribuovaná po celej dĺžke parného bubna.

3.1.2 Oddel'ovanie zložiek parovodnej zmesi

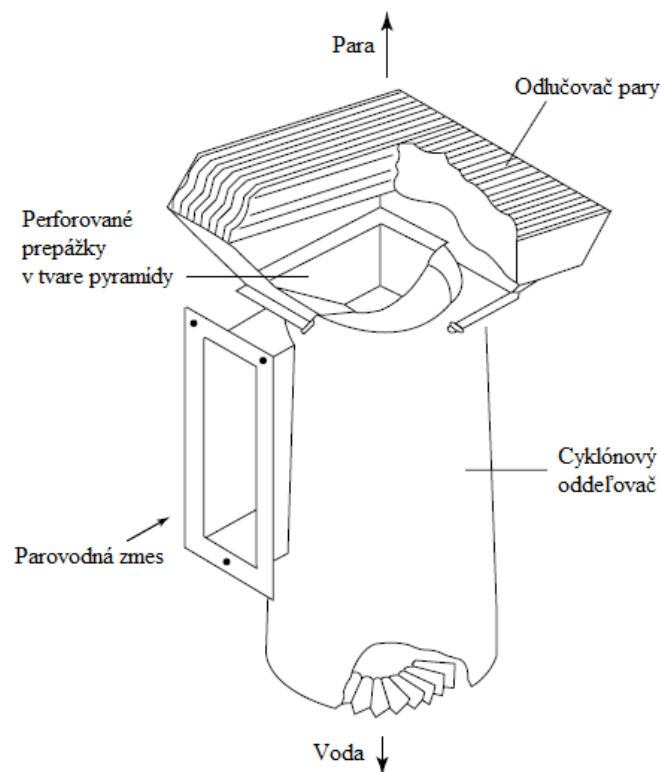
Ďalšou dôležitou funkciou je oddel'ovanie kvapalnej (voda) a plynnej (para) časti parovodnej zmesi, ktorá prichádza do parného bubna z vyparovacieho okruhu. Táto parovodná zmes obsahuje rôzne množstvá pary a je úlohou parného bubna oddeliť ju od kvapalnej zložky, ktorá prostredníctvom spádového potrubia putuje späť do vyvíjača pary, kde sa ohrieva a takto koluje vo vyparovacom okruhu. Para, ktorá sa oddelila v parnom bubne a ďalej neobsahuje žiadnu kvapalnú vodu, putuje do prehrievača pary. Oddel'ovanie pary sa uskutočňuje za vysokej rýchlosti na oddel'ovačoch pary. Tie môžu byť *prepážkové* (tzv. usmerňovače) alebo *cyklónové* (odstredivé). [3]

Prepážkové oddel'ovače (viď. obrázok 9) sú inerciálne oddel'ovače pary, ktoré spôsobujú zmenu smeru prúdenia a tým oddel'ovanie pary od vody. Používajú sa v bubnoch s pretlakom do 15 MPa. Sú lacnejšie, majú jednoduchšiu konštrukciu a nevyžadujú dlhý čas na inštaláciu a rozobratie, čím uľahčujú inšpekciu. Taktiež je ich možné nainštalovať až na mieste prevádzky bubna, čím urýchľujú výrobný proces.[3]



Obr. 9 - Prepážkové oddel'ovače [3]

Cyklónové alebo *odstredivé oddeľovače* (viď. obrázok 10) pracujú na princípe odstredivého obiehania parovodnej zmesi. Tá vstupuje do oddeľovača rýchlosťou približne 6-8 m/s po tangenciálnej dráhe. Rozdiel hustôt jednotlivých zložiek spôsobí ich oddelenie. Para zostáva uprostred a voda je odvedená na okraj oddeľovača, odkiaľ prudkým vírom vyteká zospodu oddeľovača. Tento proces je tak dynamický, že zabráňuje zaplaveniu oddeľovača aj keď je ponorený vo vode zhruba do polovice jeho výšky. Para prúdi vrchom oddeľovača pomedzi perforovanými prepážkami v tvare pyramídy, kde stráca svoju rýchlosť a je následne rozptýlená po celej ploche odlučovača pary. Na odlučovači prebieha konečná zvyšková separácia. Cyklónové oddeľovače môžu byť v prevedení vertikálnom i horizontálnom. Oba spôsoby konštrukcie dosahujú viac-menej rovnaké výsledky, horizontálny typ však zaberá menej priestoru. Odstredivé oddeľovače sa používajú v bubnoch s pretlakom až do 21 MPa, sú však drahšie a náročnejšie na dobu inštalácie ako prepážkové. [3]



Obr. 10 - Cyklónový oddeľovač [3]

3.1.3 Čistenie pary a vody

Z bubna musí odchádzať technicky čistá para, obzvlášť v prípade ak je para využívaná na pohon parnej turbíny. Preto je dôležité všetky nečistoty z nej odstrániť. Para sa môže znečistiť už pri svojom vzniku (sublimáciou, rozprášením alebo rozpúšťaním solí) alebo strhnutím kotlovej vody, ktorá vo väčšine prípadov taktiež obsahuje značné množstvo soli. Vysoká čistota pary by mala byť udržiavaná vo vodotrubných, ale aj žiarotrubných kotloch. Čistotu pary je potrebné kontrolovať i kvôli možným prudkým zmenám jej hodnoty, čo môže indikovať prenos látok z bubna. [1, 15]

Požiadavky na čistotu pary u parných turbín poháňaných priamo nasýtenou parou nie sú náročné, pretože saturovaná para začína kondenzovať na prvom stupni turbíny a nečistoty prinesené parou, ktoré sú rozpustné vo vode nespôsobujú zanášanie. Ak para neobsahuje pevné

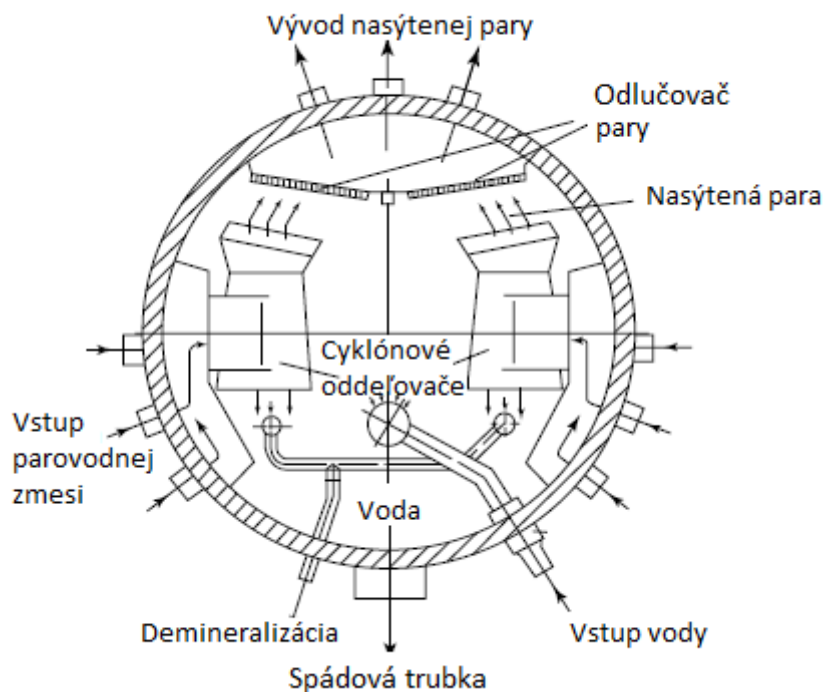
alebo kyslé častice, jej čistota výrazne neovplyvňuje výkon turbíny. Možno diskutovať jedine o korózii spôsobenej vysokou rýchlosťou dopadajúcich kvapiek vody. [15]

Zmena nastáva v prípade, že sa jedná o prehriatu paru. U parných turbín na prehriatu paru je jej čistota kritická. Vo vode rozpustné soli v prehriatej pare môžu skondenzovať a priľnúť na kovový povrch počas ochladzovania pary. Zanesenie od pary môže spôsobiť nefunkčnosť ventilov, znížený výkon, prípadne nestabilitu turbíny. Rozpustnosť slabo prchavých nečistôt, akými sú soli, hydroxidy či metalické oxidy, klesá pri expanzii pary v turbíne a je najnižšia na krivke nasýtenej pary. Kritickou oblasťou zanášania v turbínach na prehriatu paru je rad lopatiek nachádzajúci tesne nad wilsonovou čiarou. [15]

Chemické zloženie kotlovej vody je taktiež dôležité pre minimalizáciu korózie. V parnom bubne je potrebné udržiavať správne chemické zloženie vody použitím odkal'ovacieho mechanizmu. Odkal'ovanie je potrebné prepočítavať na základe kotlovej a dopĺňacej vody. Analýza dopĺňacej vody musí byť presná. [15]

3.2 Veľkosť a umiestnenie parného bubna

Veľkosť bubna a jeho umiestnenie sú určované funkciami, ktoré má plniť. Veľkosť musí byť dostatočná pre umiestnenie a nainštalovanie, prípadne odinštalovanie všetkých častí zostavy parného bubna (cyklónové oddeľovače, vysúšač pary, trubka pre prívod vody), vid'. obrázok 11. Zároveň musí byť veľkosť dostatočná na udržiavanie takého objemu vody, ktorý by bol postačujúci pre prípad náhleho nedostatku pary, kedy je potrebné rýchle vyparovanie z nasýtenej parovodnej zmesi, aby nedošlo k veľkému úbytku tlaku v prehrievači. [3]



Obr. 11 - Vostavba parného bubna [3]

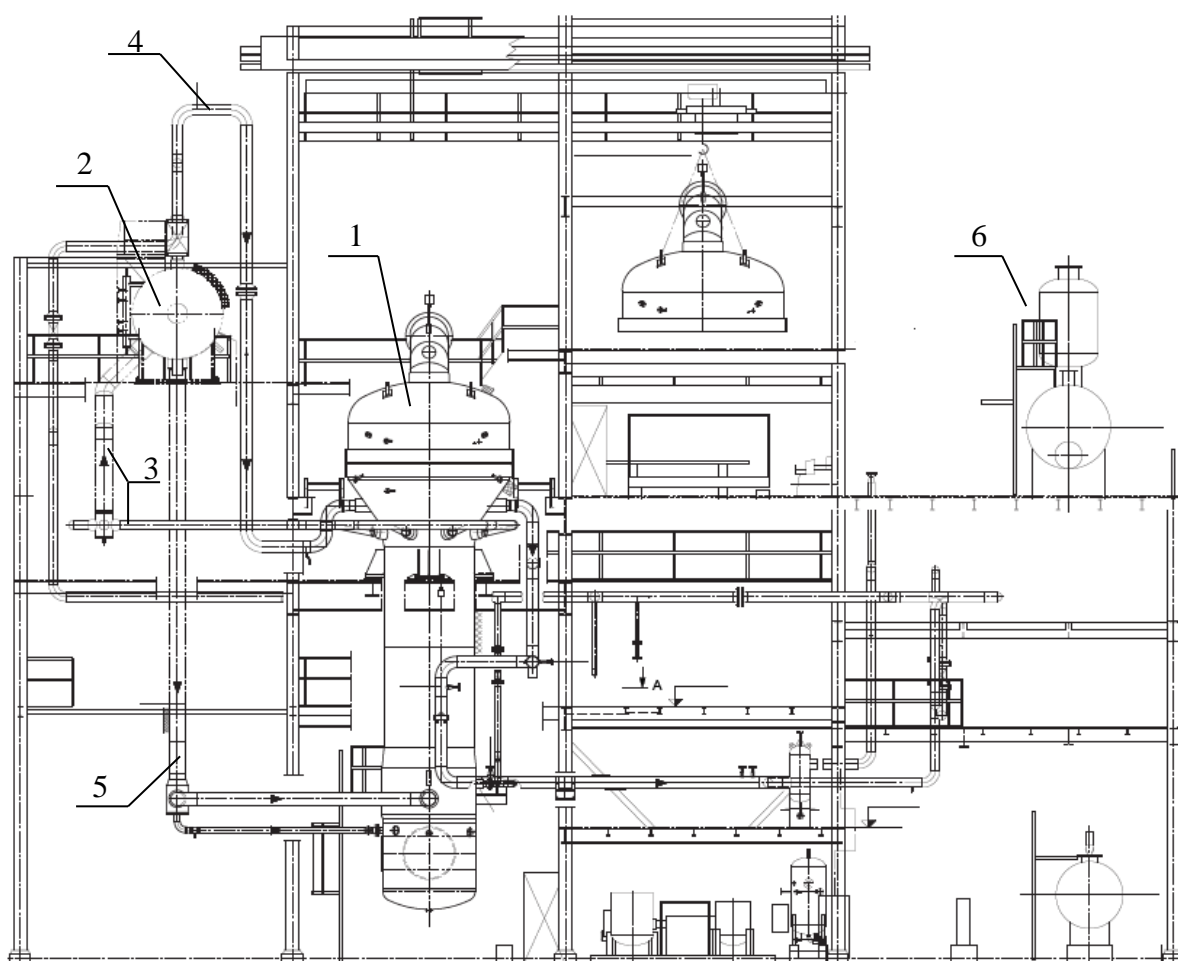
Zároveň je potrebný dostatočný priestor na umiestnenie a pripojenie všetkých potrubných vetiev napojených na parný bubon. Parný bubon (viď. obrázok 12) je vo všeobecnosti umiestnený mimo trasy odchádzajúcich plynov v kotloch s jedným bubnom, tzv. „monodrum“ princíp [3]. Existujú i kotle s dvoma bubnami, tzv. „bidrum“, kde je okrem parného bubna použitý i vodný bubon umiestnený pozične nižšie. Variant s dvoma bubnami je zvyčajne používaný u nízkotlakých kotlov, zatiaľ čo jeden bubon je aplikovaný u vysokotlakých zariadení. [13]



Obr. 12 - Parný bubon na KD3 (1 – telo parného bubna, 2 – odvod saturovanej pary z bubna, 3 – prielez s krytom)

4 Parný bubon na KD3

Parný bubon na prevádzke KD3 je najvyššie položenou časťou kotla, nakoľko potrubie pre odvod saturovanej pary tvorí najvyšší bod kotlovej sústavy (viď obrázok 13). Je orientovaný na stranu od generátora pary, ako je vidieť na obrázku 13, je teda mimo trasy odchádzajúcich spalín. Jeho vnútorný priemer je 2000 mm a celková dĺžka 6407 mm. Tvorený je valcovým plášťom o dĺžke 5300 mm a dvomi eliptickými dnami. K bubnu je pripojený vodoznak. Na parný bubon je napojených niekoľko komponentov, ako napríklad potrubia či ventily. Slúžia predovšetkým na prívod a odvod pracovných látok, ale aj na kontrolu chodu a reguláciu. Vostavbu tvoria cyklónové oddeľovače popísané v kapitole 3.1.2 a zariadenia na čistenie pary.



Obr. 13 - Kotol na KD3 (1 – spaľovacia komora a parogenerátor, 2 – parný bubon, 3 – stúpacie trubky, 4 – potrubie pre odvod nasýtenej pary: najvyšší bod kotlového systému, 5 – spádová trubka, 6 – vodná nádrž) [14]

4.1 Stúpačky a spádové potrubie

Na parný bubon nachádzajúci sa na KD3 sú napojené stúpacie trubky pre privody parovodnej zmesi, tzv. stúpačky (z angl. – „risers“) s označením A2 a A3 a taktiež aj spádová trubka (z angl. – „downcomer“) vody B2, označené na obrázku 14. Stúpačky spájajú vrchnú oblasť parogenerátora a končia v spodnej časti parného bubna, kam privádzajú parovodnú zmes z vyvíjača pary. Je extrémne náročné zmerať prietok stúpačkou z dôvodu prítomnosti zmesi zloženej z 2 fáz. Prietok vody je omnoho jednoduchšie zmerať v spádovom potrubí vody magnetickým prietokomerom. Spádová trubka odvádza vodu oddelenú z parovodnej zmesi späť do parného generátora (viď. obrázky 3 a 13). Systém stúpacích a spádových trubiek dopomáha k adekvátnemu chladeniu trubiek a trubkovnice, ktoré sú žiaruvzdorné. V praxi sa parné bubny konštruujú zvyčajne s väčším počtom stúpačiek než spádových trubiek. Platí to aj v prípade parného bubna na KD3. Experimenty ďalej ukazujú, že rozdiely v prietokoch paralelnými stúpačkami môžu ovplyvniť i prietok cez spádové potrubie a tak ovplyvniť celý pracovný cyklus. [3, 15, 16]



Obr. 14 - Komponenty bubna (1 - stúpačky A2, A3; 2 – spádová trubka B1)

4.2 Odvod pary

Technicky čistá para, ktorá sa vyseparovala zo zmesi pary a vody, prešla odlučovačom a neobsahuje ďalej žiadnu vodu opúšťa parný bubon skrz potrubie umiestnené na vrchu parného bubna (viď obrázok. 15). Na obrázku 12 možno vidieť slučku vytvorenú ako opatrenie proti dilatácii potrubia. Para sa následne týmto potrubím vracia späť ku generátoru a prechádza cez prehrievač pary, z ktorého je odvedená do parnej turbíny (viď. obrázky 2 a 13).



Obr. 15 - Odvod pary z parného bubna (1)

4.3 Prívod napájacej vody

Napájacia voda nahrádza objem vody odchádzajúci z bubna v podobe saturovanej pary. Je privádzaná z vodnej nádrže (viď. obrázok 13). Potom čo bola voda filtrovaná a odvzdušnená, je pumpovaná do parného bubna (viď. obrázok 16). Aj napriek tomu, že nároky na čistotu napájacej vody sú pochopiteľne vysoké, obsahuje určité percento nečistôt, s ktorými treba počítať pri výpočte odkaľovania. Percento nečistôt by však malo byť natoľko malé, aby nebolo potrebné zvýšené odkaľovanie. Teplota napájacej vody by mala byť ideálne o 30 °C nižšia než je teplota saturácie. Tento rozdiel zabráni nežiadúcej interakcii vody a pary. [3, 16]



Obr. 16 - Prívod napájacej vody (1)

4.4 Odkal'ovacie potrubie

Ako voda postupne cirkuluje cez vyparovací systém a nasýtená čistá para odchádza z okruhu, zvyšuje sa objem nečistôt v parnom bubne. Keďže väčšina vody z parovodnej zmesi zostáva v okruhu, nečistoty sa nikdy nedostanú zo systému. Navyše, napájacia voda, ktorá nahrádza odchádzajúcu paru obsahuje taktiež isté množstvo nečistôt a teda ich hodnota v bubne narastá. Tomu sa zabráňuje odkal'ovacím potrubím (viď. obrázok 17), ktorým nepretržite tečie nevel'ké množstvo vody z bubna do odkal'ovacej nádrže. Množstvo odoberanej vody je závislé na množstve nečistôt a na hodnote požadovanej čistoty pary, avšak obecné je to 1 % až 3 % z hodnoty prietoku napájacej vody. [17]



Obr. 17 - Odkal'ovacie potrubie (1 – odkal'ovacie potrubie, 2 – spádové potrubie vody)

4.5 Poistný ventil a odvzdušňovacie ventily

Nevyhnutným prvkom všetkých tlakových zariadení kotla (či už je to bubon, horúce potrubné vetvy, atď.) sú poistné ventily (viď. obrázok 18). Zabezpečujú bezpečnú prevádzku vysokotlakových zariadení a zaručujú ochranu proti nárastu tlaku nad kritickú hodnotu. Elektro-mechanické poistné ventily sú umiestňované na hlavné parovody. Každý poistný ventil je opatrený únikovou trúbkou a tlmičom. Nastavenie poistného ventilu sa upravuje ešte pred spustením parného generátora do prevádzky. Bežne používané sú pružinové poistné ventily. [18] Na bubne sa ďalej nachádzajú odvzdušňovacie ventily, ktorými uniká vzduch pri naplňaní parného bubna vodou a ventily na kontrolu tlaku a teploty (viď. obrázok 19).



Obr. 18 - Poistný (1) a kontrolný (2) ventil parného bubna na KD3



Obr. 19 - Ventily (1) parného bubna na KD3

5 Platná európska legislatíva

Pre netopené tlakové nádoby platí v súčasnosti v Českej republike jednotná norma schválená európskym výborom pre normalizáciu, ktorá má taktiež status štátnej normy. Jedná sa o európsku normu EN 13445 [19], v Českej republike známou pod označením ČSN EN 13445 [4]. Táto norma pozostáva z nasledujúcich častí:

- Časť 1: Všeobecne
- Časť 2: Materiály
- Časť 3: Konštrukcia a výpočet
- Časť 4: Výroba
- Časť 5: Kontrola a skúšanie
- Časť 6: Požiadavky pre navrhovanie a výrobu tlakových nádob a tlakových častí z liatiny s guľčkovým grafitom
- Časť 7: Návod na používanie postupov posúdenia zhody
- Časť 8: Doplnujúce požiadavky na nádoby z hliníku a zliatin hliníku
- Časť 9: Konformita rady EN 13445 k ISO 16528

V tejto práci bola uplatnená tretia časť normy ČSN EN 13445-3 [4]. Táto časť európskej normy stanovuje požiadavky na konštrukciu a výpočet netopených tlakových nádob podľa EN 13445-1 [19] zhotovených z ocelí podľa EN 13445-2 [19]. Rovnako bola použitá i piata časť normy ČSN EN 13445-5 [4]. Príloha C z EN 13445-5 [19] stanovuje požiadavky na konštrukciu prístupových a kontrolných otvorov, uzatváracích mechanizmov a špeciálnych blokovacích elementov. Ďalej sú v práci použité výsledky získané výpočtom podľa starej verzie nemeckej normy AD Merkblatt [5].

6 Pevnostný výpočet

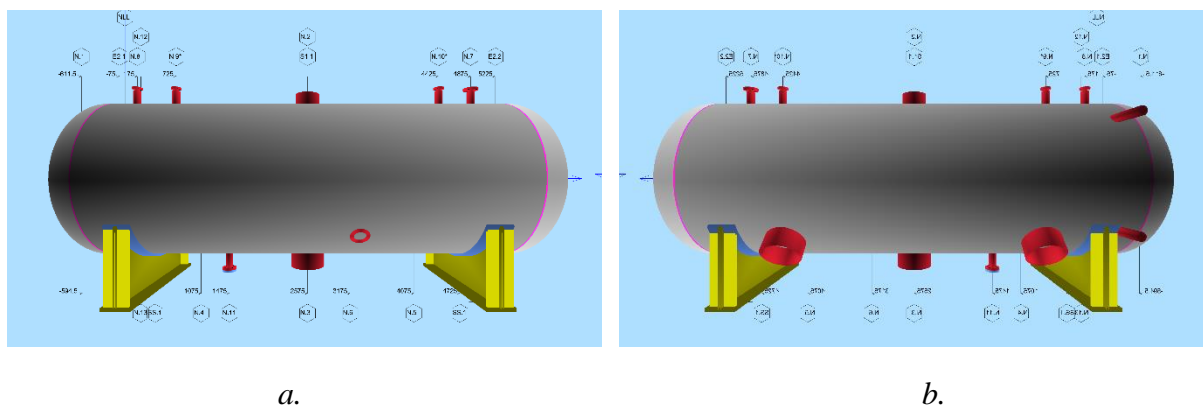
Norma, na základe ktorej bolo technické zariadenie navrhnuté je záväzná pre toto zariadenia aj v čase, kedy sa už daná norma nepoužíva a bola nahradená novou. Skúmaný parný bubon bol navrhnutý na základe normy AD Merckblatt [5] v roku 1998. Táto stará nemecká norma sa v súčasnosti už nepoužíva, na výpočet netopených tlakových zariadení platí jednotná európska norma EN 13445 [19]. V tejto práci bol v prvom kroku vykonaný kontrolný pevnostný výpočet podľa ČSN EN 13445 [4] z roku 2017.

6.1 Kontrolný pevnostný výpočet

Kontrolný pevnostný výpočet je možné uskutočniť manuálne dodržiavajúc postup podľa jednotlivých kapitol normy ČSN EN 13445 [4]. Taktiež je možné využiť niektorý z dostupných výpočtových softwarov obsahujúcich možnosť výpočtu podľa tejto normy. V tejto práci bol použitý softwarový prístup za pomoci výpočtového programu Virtual Vessel Design [20] (ďalej len „VVD“), kde bola zvolená verzia normy ČSN EN 13445 2014 Issue 4:2017 [4].

Kontrolný výpočet parného bubna bol uskutočnený na základe dostupných parametrov konštrukcie existujúceho zariadenia získaných z výkresovej dokumentácie zariadenia a čiastočne i z pôvodného výpočtu [5] z roku 1998. Z dostupných údajov bol vytvorený 3D model zariadenia (viď. obrázok 20 a 25) zložený z valcového plášťa s eliptickými dnami na oboch stranách, nátrubkami pre prívod a odvod pracovných látok či ventilmi. Malé otvory do priemeru 50 mm boli vo výpočte zanedbané, ako povoľuje norma ČSN EN 13445-3[4] v odseku 9.5.2.2 o vystužovaní malého otvoru pri splnení daných podmienok. Toto zjednodušenie bolo vykonané u dvoch otvorov o priemere 46,5 mm. Zadané vstupné parametre výpočtu boli návrhový pretlak 5 MPa, skúšobný pretlak 6,5 MPa a prevádzková teplota 265 °C. Do výpočtu boli ďalej vložené materiálové dáta.

Materiály boli volené tak, aby boli identické, resp. sa ich vlastnosti čo najviac zhodovali s vlastnosťami materiálov použitých na reálnom zariadení. Valcový plášť, eliptické dna, nátrubky A1, A2, A3, B1, B2 a výstužný prstenec prielezu H1 boli vyrobené z materiálu 15NiCuMoNb5 (W1.6368). Identický materiál bol použitý i vo výpočte vo VVD [20]. Ostatné komponenty boli vyrobené z materiálu 15Mo3. Tento konkrétny materiál nebolo možné použiť vo výpočte vo VVD [20], bol preto nahradený materiálom 16Mo3 s podobným chemickým zložením a vlastnosťami.



Obr. 20 - 3D model parného bubna (a. – pohľad spredu, b. -pohľad zozadu)

Výsledky kontrolného pevnostného výpočtu boli následne spracované do nižšie uvedených tabuliek a porovnané s dostupnými výsledkami výpočtu podľa AD Merkblatt [5].

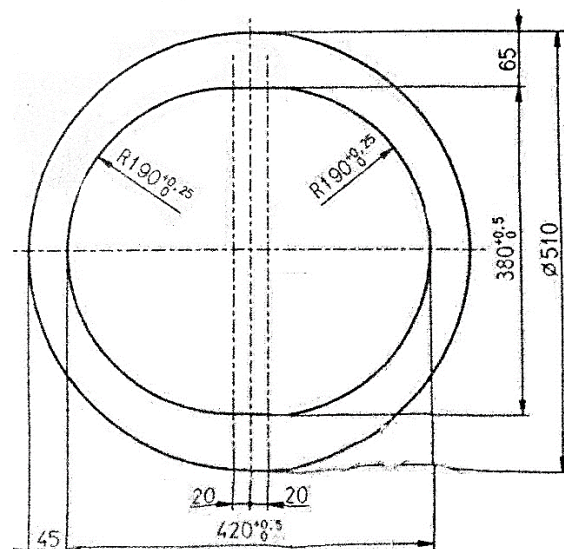
V tabuľke 1 sa nachádza porovnanie jedného z kľúčových parametrov konštrukcie parného bubna – požadovaná minimálna hrúbka steny. Je to minimálna hrúbka materiálu steny nádoby v neskorodovanom stave. Analyzovaná hrúbka je súčet požadovanej hrúbky, korózneho prídavku a hrúbky pridanej pre doplnenie na menovitú hrúbku. Z výsledkov možno usúdiť, že medzi jednotlivými normami sú menšie rozdiely. Zatiaľ čo u valcovej škrupiny predstavujúcej plášť nádoby a eliptických dnen je požadovaná hrúbka podľa ČSN EN 13445-3 [4] väčšia, u zvyšných komponent napojených na parný bubon je možné sledovať opačný trend.

Tabuľka 1 Požadovaná minimálna hrúbka steny [mm]

| | ČSN EN 13445 | AD MERKBLATT |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| Valcový plášť | 21,59 | 20,63 |
| Eliptické dno | 21,15 | 20,40 |
| Prielez H1 | 4,50 | 6,27 |
| Prívod vody A1 | 2,47 | 3,43 |
| Stúpačky A2, A3 | 4,87 | 5,80 |
| Odvod sýtej pary B1 | 3,45 | 4,40 |
| Spádová trubka B2 | 4,87 | 5,80 |
| Poistný ventil S1 | 1,98 | 2,96 |
| Ventily F1, P1, P2 | 1,98 | 2,96 |
| Odkal'ovacie potrubie G1 | 1,98 | 2,96 |
| Nátrubky M1, M3 | 1,98 | 2,96 |

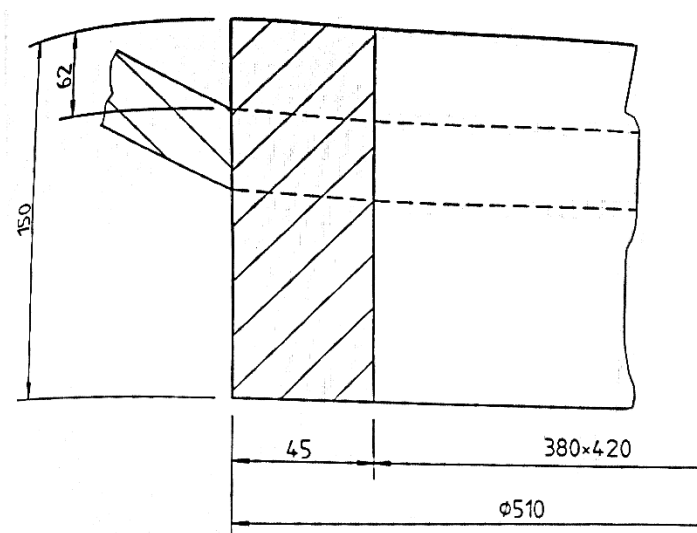
Požadovaná minimálna hrúbka steny je menšia, a to až o 1 mm. V prípade prielezu H1 dokonca o 1,7 mm. Tu však treba podotknúť, že tento údaj môže byť skreslený z dôvodu použitia zjednodušenej geometrie prielezu H1.

Prielez H1 bol na terajšom zariadení navrhnutý s vonkajším priemerom kruhovým a s vnútorným priemerom oválnym. V eliptickom dne nádoby teda vznikol kruhový otvor o priemere 510 mm. Vnútorný priemer prielezu – rozdiel vonkajšieho priemeru a hrúbky steny, však nebol kruhový, ale oválny. Táto konštrukcia bola dosiahnutá meniacou sa hrúbkou steny po obvode prielezu. Jeho rozmery boli 420 x 45 mm a 380 x 65 mm (viď. obrázky 21 a 22).



Obr. 21 - Detail skutočnej geometrie prielezu H1 [21]

Program VVD [20] neumožňuje vytvorenie takejto geometrie. Preto bolo potrebné zvoliť taký prístup, ktorý nahrádza danú geometriu jednoduchšou a zároveň neznehodnocuje výsledky výpočtu ich skresľovaním smerom k nižším hodnotám napätí, resp. menším hrúbkam stien, aké by boli v skutočnosti potrebné. Pre získanie konzervatívnych výsledkov bolo zvolené zjednodušenie v tvare kruhového otvoru s vonkajším priemerom 510 mm a vnútorným priemerom 420 mm s konštantnou hrúbkou steny 45 mm. Toto zjednodušenie predstavuje prípad najmenšieho vystuženia otvoru, a teda je možné konštatovať, že ak je dané vystuženie dostatočné pre požiadavky tejto práce, je dostatočné aj vystuženie zabezpečené otvorom nekruhovým, resp. oválnym.



Obr. 22 - Detail polohy prielezu H1 vzhľadom na eliptické dno [21]

Pri vytvorení otvoru v plášti nádoby dochádza k jeho oslabeniu. Škrupina, v ktorej sa vyskytuje otvor, musí byť v oblasti priľahlej k otvoru primerane vystužená. Vystuženie je zaťažaná plocha priečného prierezu kovu, ktorá prenáša zaťaženie oblasti otvoru tlakom. V danom mieste je potrebné otvor dostatočne vystužiť. Takéto vystuženie nahrádza zmenšenie nosného prierezu

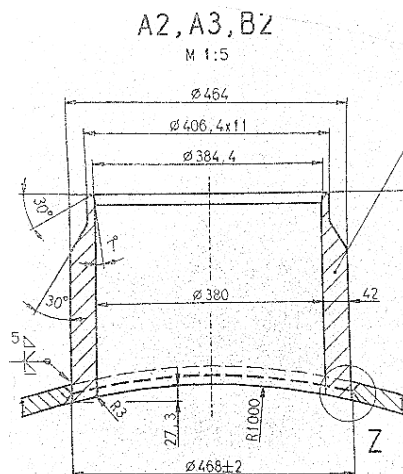
pre zaťaženie tlakom a musí byť uskutočnené buď zväčšením hrúbky steny škrupiny nad hrúbku požadovanú pre škrupinu bez otvoru, použitím výstužného goliera, použitím výstužného prstenca, zväčšením hrúbky steny hrdla nad hrúbku požadovanú pre membránové napätie od zaťaženia tlakom alebo kombináciou vyššie uvedených. [4]

Dĺžka hrdla prispievajúca k vystuženiu je parameter, ktorý určuje minimálnu dĺžku nasadeného, vsadeného či priechodzieho hrdla s ohľadom na priemer otvoru a hrúbku steny nátrubky. V tabuľke 2 sú uvedené výsledky výpočtu vonkajšej dĺžky hrdla prispievajúcej k vystuženiu.

Tabuľka 2 Vonkajšia dĺžka hrdla prispievajúca k vystuženiu [mm]

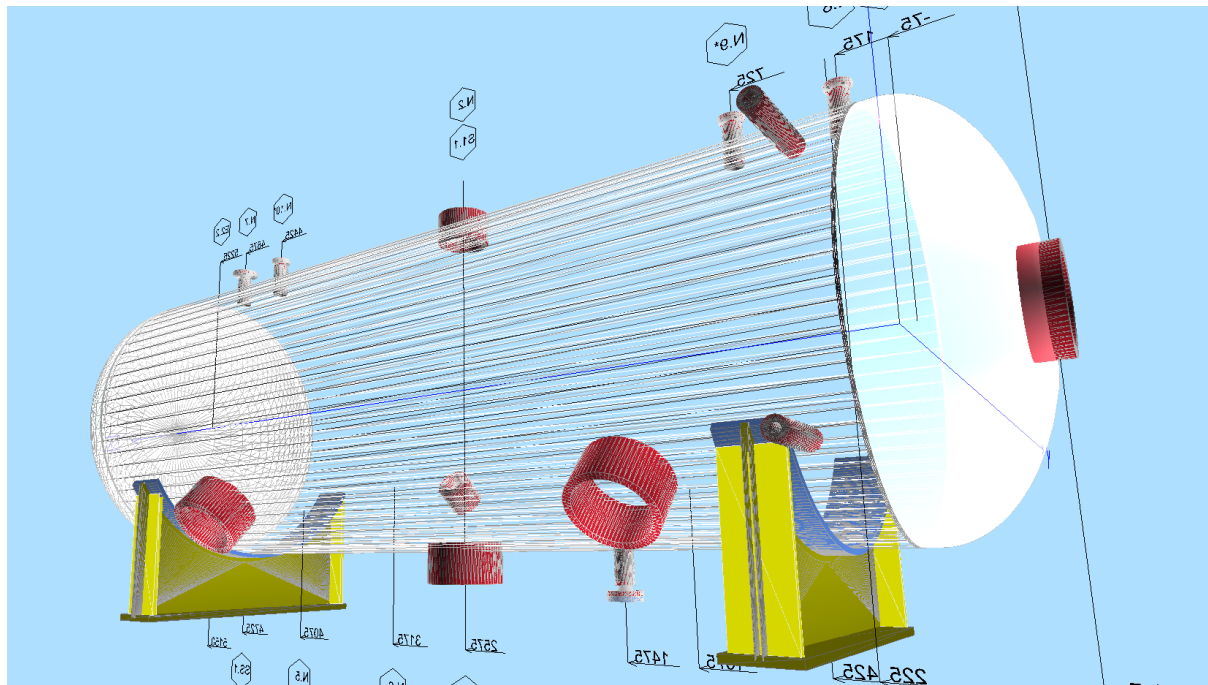
| | ČSN EN 13445 | AD MERKBLATT |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| Prielez H1 | 63 | 63 |
| Prívod vody A1 | 86,86 | 57,3 |
| Stúpačky A2, A3 | 120,91 | 160,9 |
| Odvod sýtej pary B1 | 95,42 | 126,8 |
| Spádová trubka B2 | 120,91 | 160,9 |
| Poistný ventil S1 | 43,17 | 56,7 |
| Ventily F1, P1, P2 | 43,17 | 56,7 |
| Odkal'ovacie potrubie G1 | 43,17 | 56,7 |
| Nátrubky M1, M3 | 43,17 | 33,4 |

V prípade hrdiel A2, A3, B1, B2, G1, S1, F1, P1, P2 bolo potrebné pristúpiť k zjednodušeniu, nakoľko program VVD [20] neumožňuje vytvoriť skutočnú geometriu týchto hrdiel. Skutočnú, resp. zjednodušenú geometriu hrdiel A2, A3 a B2 možno vidieť na obrázku 23, resp. 24.



Obr. 23 - Skutočná geometria hrdiel A2, A3, B2 [21]

V skutočnosti sa v hornej časti hrdla sa nachádza zúženie. Toto zúženie je za hodnotou dĺžky hrdla prispievajúcej k vystuženiu a teda daná časť hrdla nemá na vystuženie vplyv. Zúženie je použité zrejme z dôvodu úspory materiálu. Použitie zjednodušenie teda nevysvetľuje značné rozdiely vo výsledkoch v tabuľke 2 a je možné konštatovať, že boli spôsobené rozdielnosťou noriem.



Obr. 24 - 3D model parného bubna (detail hrdiel A2, A3, B1)

Porovnateľným parametrom je aj vypočítaná dĺžka prispievajúca k vystuženiu pozdĺž steny plášťa uvedená v tabuľke 3. Hodnoty vypočítané podľa normy ČSN EN 13445 [4] sú približne rovnaké ako hodnoty podľa AD Merkblatt [5], odchýlky sa pohybujú rozmedzí 1,5–2,5 %.

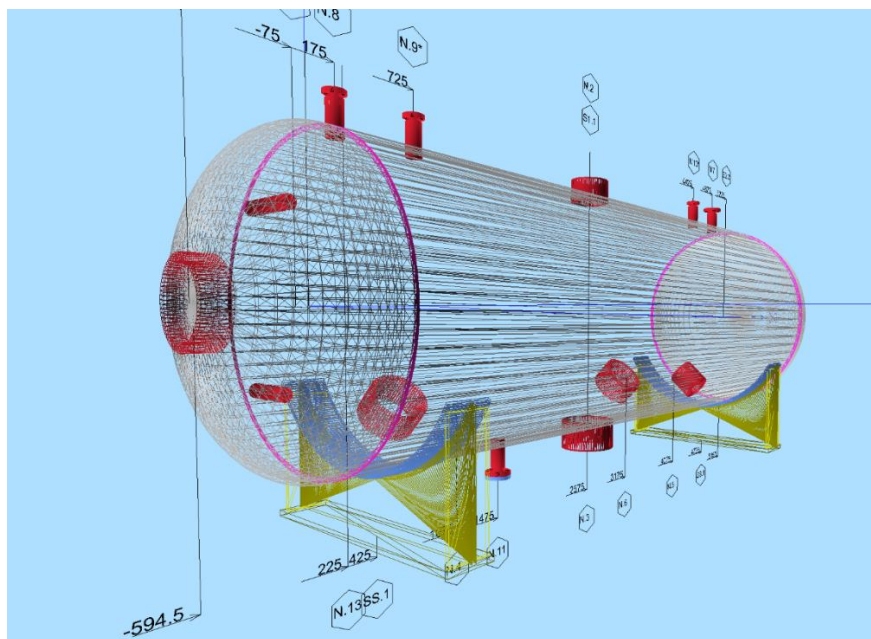
Tabuľka 3 Vypočítaná dĺžka prispievajúca k vystuženiu pozdĺž steny plášťa [mm]

| | ČSN EN 13445 | AD MERKBLATT |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| Prielez H1 | 289,17 | 282,1 |
| Prívod vody A1 | 231,04 | 234,1 |
| Stúpačky A2, A3 | 231,04 | 234,1 |
| Odvod sýtej pary B1 | 231,04 | 234,1 |
| Spádová trubka B2 | 231,04 | 234,1 |
| Poistný ventil S1 | 231,04 | 234,1 |
| Ventily F1, P1, P2 | 231,04 | 234,1 |
| Odkal'ovacie potrubie G1 | 231,04 | 234,1 |

V tabuľke 4 a 5 sa nachádza porovnanie výpočtu plochy zaťaženej tlakom. V tabuľke 4 sa jedná o plochu otvoru hrdla, kde jednotlivé výsledky výrazne varujú v závislosti na danom komponente oproti pôvodnému výpočtu. Nie je tu pozorovateľný jasný trend vo výsledkoch. Hodnoty vypočítané pre prielez H1, prívod vody A1 a prepojovacie trubky M1, M3 sú porovnateľné s výsledkami pôvodného výpočtu, zatiaľ čo hodnoty pre prívody parovodnej zmesi A2, A3, odvod sýtej pary B1 a spádové potrubie B2 sú výrazne vyššie. Naopak, odkalovacie potrubie G1 a ventily S1, F1, P1, P2 vykazujú značne menšiu plochu otvoru zaťaženu tlakom. Vykonané zjednodušenia by nemali mať vplyv na tento parameter.

Tabuľka 4 Výpočet plochy zaťaženej tlakom - plocha otvoru hrdla [mm²]

| | ČSN EN 13445 | AD MERKBLATT |
|--------------------------|--------------|--------------|
| Prielez H1 | 14 553 | 12 830 |
| Prívod vody A1 | 8 954 | 9 743 |
| Stúpačky A2, A3 | 29 148 | 13 084 |
| Odvod sýtej pary B1 | 16 310 | 11 287 |
| Spádová trubka B2 | 29 148 | 13 084 |
| Poistný ventil S1 | 2 075 | 7 767 |
| Ventily F1, P1, P2 | 2 075 | 7 767 |
| Odkal'ovacie potrubie G1 | 2 075 | 7 767 |
| Nátrubky M1, M3 | 1 310 | 1 096 |



Obr. 25 - 3D model parného bubna (skeletový pohľad)

V tabuľke 5 sú uvedené výsledky výpočtu plochy zaťaženej tlakom pre škrupinu (plášť) v pozdĺžnej, resp. obvodovej rovine. Výpočet prebieha pre oba typy roviny a výsledná hodnota je maximum z týchto dvoch získaných výsledkov. Vo všetkých prípadoch je plocha počítaná pre valcovú škrupinu (valcový plášť), okrem komponentu H1, u ktorého je plocha počítaná pre kužeľovú škrupinu (viď. príloha 3), čo vyplýva z polohy prielezu H1. Sú badateľné odchýlky medzi hodnotami vypočítanými na základe ČSN EN 13445 [4] a hodnotami podľa AD Merkblatt [5].

Tabuľka 5 Výpočet plochy zaťaženej tlakom – škrupina v pozdĺžnej / obvodovej rovine [mm²]

| | ČSN EN 13445 | AD MERKBLATT |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| Prielez H1 | 481 000 | 452 594 |
| Prívod vody A1 | 349 140 | 351 373 |
| Stúpačky A2, A3 | 463 830 | 502 794 |
| Odvod sýtej pary B1 | 396 220 | 418 873 |
| Spádová trubka B2 | 463 830 | 502 794 |
| Poistný ventil S1 | 284 030 | 289 061 |
| Ventily F1, P1, P2 | 284 030 | 289 061 |
| Odkal'ovacie potrubie G1 | 284 030 | 289 061 |

Tabuľka 6 na rozdiel od vyššie uvedených tabuliek neporovnáva výsledky výpočtu podľa ČSN EN 13445 [4] a AD Merkbblatt [5], nakoľko vo vyššie uvedených tabuľkách už boli zhodnotené všetky dostupné porovnateľné výsledky. Tabuľka 6 vypovedá o odseku 9.5.2 normy ČSN EN 13445-3 – pravidlá pre vystužovanie osamoteného otvoru použitím rovnice 9.5-7 [4]. V ľavom stĺpci tabuľky sú uvedené hodnoty požadovanej tlakovej plochy $pA(\text{req.})$. V pravom stĺpci sa ďalej nachádza dostupná tlaková plocha $pA(\text{aval.})$. Nutnou podmienkou realizovateľnosti komponentu je, aby dostupná tlaková plocha bola väčšia ako požadovaná. Daný predpoklad je splnený u všetkých komponentov zariadenia.

Tabuľka 6 Pravidlá pre vystužovanie podľa ČSN EN 13445-3 (9.5.2) [4]

| | Požadovaná tlaková plocha $pA(\text{req.})$ [kN] | Dostupná tlaková plocha $pA(\text{aval.})$ [kN] | $pA(\text{req.}) < pA(\text{aval.})$ |
|---------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| Prielez H1 | 2 550,77 | 3 000,19 | ✓ |
| Prívod vody A1 | 1 792,74 | 2 432,84 | ✓ |
| Stúpačky A2, A3 | 2 468,35 | 2 587,54 | ✓ |
| Odvod sýtej pary B1 | 2 062,63 | 2 285,68 | ✓ |
| Spádová trubka B2 | 2 469,82 | 2 587,52 | ✓ |
| Poistný ventil S1 | 1 430,50 | 1 682,59 | ✓ |
| Ventily F1, P1, P2 | 1 262,50 | 1 476,60 | ✓ |
| Odkal'ovacie potrubie G1 | 1 433,37 | 1 682,55 | ✓ |
| Nátrubky M1, M3 | 1 430,5 / 1 432,19 | 1 682,57 | ✓ |

Podobne ako tabuľka 6, aj tabuľka 7 obsahuje výsledky výpočtu, tentoraz však podľa normy ČSN EN 13445-5: Kontrola a skúšanie [4]. V záverečnej tabuľke sú uvedené hodnoty maximálneho dovoleného tlaku novej, neskoroďovanej nádoby v studenom stave a následne hodnoty maximálneho skúšobného tlaku, ktorý je pre účely tejto práce smerodajným ukazovateľom.

Tabuľka 7 Maximálny dovolený a maximálny skúšobný tlak podľa ČSN EN 13445 [4] [MPa]

| | Maximálny dovolený tlak | Maximálny skúšobný tlak |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Valcový plášť | 6,61 | 10,74 |
| Eliptické dná | 5,88 | 9,56 |
| Prielez H1 | 5,83 | 10,18 |
| Prívod vody A1 | 6,77 | 11,82 |
| Stúpačky A2, A3 | 5,25 | 9,16 |
| Odvod sýtej pary B1 | 5,53 | 9,71 |
| Spádová trubka B2 | 5,25 | 9,16 |
| Poistný ventil S1 | 5,87 | 10,45 |
| Ventily F1, P1, P2 | 5,84 | 10,45 |
| Odkalňovacie potrubie G1 | 5,87 | 10,43 |
| Nátrubky M1, M3 | 5,87 | 10,43 |

6.2 Návrhový pevnostný výpočet

Návrhový pevnostný výpočet sa uskutočňuje zadáním základných vstupných údajov (tlak, teplota), na základe ktorých sa postupne dopočítavajú ostatné parametre. V prípade parného bubna bol požadovaným parametrom skúšobný pretlak 7,6 MPa. Skúšobný tlak je hodnota dopočítavaná na základe tlakového zaťaženia nádoby.

Kontrolný výpočet v tabuľke 7 preukázal, že hodnota maximálneho skúšobného tlaku je u každého komponentu vyššia ako požadovaných 7,6 MPa. Najnižšia spomedzi týchto hodnôt je 9,163 MPa platná pre stúpačky. Na základe kontrolného pevnostného výpočtu možno teda konštatovať, že aktuálna konštrukcia parného bubna spĺňa podľa normy ČSN EN 13445 [4] konštrukčné požiadavky na zaťaženie skúšobným pretlakom 7,6 MPa. Návrhový výpočet preto nie je potrebný.

7 Diskusia

Na základe vykonaného výpočtu možno konštatovať, že stávajúce zariadenie spĺňa teoretické technické predpoklady pre zaťaženie požadovaným pretlakom. Program VVD [20] navyše určil podľa odseku 10.2.3.3.1-1 a 2 normy ČSN EN 13445-5 [4] minimálny skúšobný tlak o hodnote 7,15 MPa. Skúšobný pretlak terajšieho zariadenia s návrhovým pretlakom 5 MPa, je 6,5 MPa, čo je podľa normy ČSN EN 13445-5 [4] nevyhovujúce. Hodnota skúšobného tlaku by sa mala pohybovať v intervale 7,15 MPa až 9,163 MPa, kam spadá i požadovaná hodnota 7,6 MPa.

Záver

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom konštrukcie parného bubna pre vyšší tlak. Práca je vytvorená v spolupráci so spoločnosťou DUSLO a. s. a zadanie práce je zamerané na reálny problém vyskytujúci sa v kotle na prevádzke výroby kyseliny dusičnej v tejto spoločnosti.

V úvode práce je spracovaná rešerš parných kotlov, ich funkcia a rozdelenie. V nasledujúcej kapitole je podrobne popísaný predmetný kotol a jeho význam v technologickom procese výroby kyseliny dusičnej. Práca obsahuje definíciu a popis jednotlivých častí (zariadení) daného kotla, ich funkciu a umiestnenie v zostave.

Následne sa práca podrobnejšie venuje kotlovému telesu – parnému bubnu. V rozsahu dvoch kapitol je najskôr spracovaná všeobecná rešerš parného bubna, jeho význam a funkcie v kotle. Ďalej je popísaný predmetný bubon na KD3 a komponenty naň napojené, s ktorými je počítané v následnom výpočte. Je popísaná funkcia týchto komponentov doložená výkresovou dokumentáciou a fotografiami skutočného zariadenia.

V kapitole 5 je stručne popísaná norma ČSN EN 13445 [4] upravujúca netopené tlakové nádoby, ich konštrukciu, výpočet a skúšanie. Sú popísané jej jednotlivé časti a podmienky platnosti ako štátnej normy.

Záverečná kapitola sa venuje pevnostnému výpočtu parného bubna pomocou výpočtového softwaru Virtual Vessel Design [20]. V jednotlivých odsekoch je popísaný postup výpočtu, tvorba 3D modelu zariadenia, použité zjednodušenia geometrie a v tabuľkách sú popísané výsledky výpočtu. Tabuľky 1 – 5 porovnávajú výsledky vypočítané softwarom VVD [20] podľa normy ČSN EN 13445 [4] s výsledkami výpočtu podľa staršej nemeckej normy AD Merkblatt [5], pôvodne použitej na výpočet predmetného parného bubnu v roku 1998. Podobnosť jednotlivých výsledkov je rôznorodá pre každú tabuľku, resp. pre každý sledovaný parameter. Tabuľky 6 a 7 následne popisujú parametre, ktorých porovnanie nebolo možné z dôvodu nedostupnosti pôvodných výsledkov. Sú popísané teda iba výsledky dopočítané normou ČSN EN 13445 [4].

V tabuľke 7 sú hodnoty maximálneho dovoleného a maximálneho skúšobného tlaku jednotlivých komponentov. Z výsledkov je zrejmé, že všetky časti parného bubna majú maximálnu prípustnú hodnotu skúšobného pretlaku nad požadovaných 7,6 MPa, najnižšia maximálna hodnota predstavuje 9,163 MPa, najvyššia dokonca 11,82 MPa. Podľa odseku 10.2.3.3.1-1 a 2 normy ČSN EN 13445-5 [4] bol určený taktiež minimálny skúšobný tlak. Hodnota minimálneho skúšobného tlaku vyšla 7,15 MPa.

Záverom teda je, že aktuálna konštrukcia parného bubna z technického hľadiska spĺňa konštrukčné požiadavky podľa normy ČSN EN 13445 [4] na zaťaženie skúšobným pretlakom 7,6 MPa. Ďalej, skúšobný pretlak stávajúceho zariadenia s návrhovým pretlakom 5 MPa a skúšobným pretlakom 6,5 MPa je podľa ČSN EN 13445-5 [4] nedostatočný a skúšobný tlak mal by mať hodnotu minimálne 7,15 MPa.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. B.m.: SNTL Praha, 1983.
- [2] POLACH, CSC., doc. Ing. Vladislav. *Parní kotle*. In: . B.m.
- [3] RAYAPROLU, Kumar. *Boilers for Power and Process*. B.m.: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-7537-3.
- [4] ČSN EN 13445 *Netopené tlakové nádoby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [5] *AD Merkblatt B: Berechnung von Druckbehältern*. Berlín: Deutsches Institut für Normung, 1997.
- [6] *TTR pre výrobu kyseliny dusičnej 60%*. Technická správa. 2. Šaľa: DUSLO a. s. 2012.
- [7] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *P&I Diagramm*. 13. listopad 2015
- [8] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER, WASTE HEAT BOILER - GENERAL ARRANGEMENT*. 21. květen 2015
- [9] WANG, C. a Y. ZHU. Entransy analysis on boiler air pre-heater with multi-stage LHS unit. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2018, **130**, 1139–1146. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.11.085
- [10] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMONIA CONVERTER BURNER HOOD*. 1. prosinec 2015
- [11] TROJAN, Marcin a Dawid TALER. Thermal simulation of superheaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas. *Fuel* [online]. 2015, **150**, 75–87. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2015.01.095
- [12] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *AMMONIA CONVERTER, WASTE HEAT BOILER, SUPERHEATER, WALL COILS*. 22. říjen 2015
- [13] What is a Boiler Steam Drum? *Thermodyne Engineering Systems* [online]. 22. března 2017 [vid. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://thermodyneboilersblog.wordpress.com/2017/03/22/what-is-a-boiler-steam-drum/>
- [14] SCHMIDTSCHESCHACK - ARVOS GMBH. *GENERAL ARRANGEMENT- AMONIA CONVERTER WASTE HEAT BOILER; STEAM DRUM*. 28. leden 2016
- [15] GANAPATHY, V. *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations*. B.m.: CRC Press, 2002. ISBN 978-0-203-91022-1.
- [16] BASU, Dipankar N., N. D. PATIL, Souvik BHATTACHARYYA a P. K. DAS. Hydrodynamics of a natural circulation loop in a scaled-down steam drum-riser-downcomer assembly. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2013, **265**, 411–423. ISSN 0029-5493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2013.07.031

-
- [17] ERIKSEN, Vernon L. *Heat Recovery Steam Generator Technology*. B.m.: Woodhead Publishing, 2017. ISBN 978-0-08-101941-2.
- [18] SARKAR, Dipak K. Chapter 12 - Floating of Steam Generator Safety Valves. In: Dipak K. SARKAR, ed. *Thermal Power Plant* [online]. B.m.: Elsevier, 2017 [vid. 2019-05-19], s. 245–261. ISBN 978-0-08-101112-6. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101112-6.00012-5
- [19] *EN 13445: Unfired Pressure Vessels*. Brussels: European Committee for Standardization, 2017.
- [20] CADWorx & Analysis Solutions. *Virtual Vessel Design* [software]. Srpen 2016. [přístup 3.8.2016]. Dostupné z <http://www.coade.com/products/visual-vessel-design>
- [21] WLUDYKA a CHOROVSKÝ. *STEAM DRUM F104 - ASSEMBLY*. B.m.: STEINMÜLLER GUMMERSBACH. 7. květen 1998

Zoznam použitých obrázkov

| | |
|---|----|
| Obr. 1 - Parný kotol na KD3 (1 - parný bubon/kotlové teleso, 2 – generátor pary) | 12 |
| Obr. 2 – Schematický náčrt kotlového systému [7] | 13 |
| Obr. 3 - Schéma parného generátora na KD3 [8] | 15 |
| Obr. 4 – Náčrt spaľovacej komory kotla na KD3 (1 - prívod paliva, 2 - kryt spaľovacej komory) [10] | 17 |
| Obr. 5 - Spaľovacia komora kotla na KD3 | 17 |
| Obr. 6 - Detail spaľovacej komory kotla na KD3 (1 - prívod vodíka, 2 - prívod paliva) | 18 |
| Obr. 7 - Prehrievač pary v kotle na KD3 [12] | 18 |
| Obr. 8 - Potrubné vetvy parného bubna (1 – parný bubon, 2 – parogenerátor) [14] | 20 |
| Obr. 9 - Prepážkové oddelovače [3] | 21 |
| Obr. 10 - Cyklónový oddelovač [3] | 22 |
| Obr. 11 - Vostavba parného bubna [3] | 23 |
| Obr. 12 - Parný bubon na KD3 (1 – telo parného bubna, 2 – odvod saturovanej pary z bubna, 3 – prielez s krytom) | 24 |
| Obr. 13 - Kotol na KD3 (1 – spaľovacia komora a parogenerátor, 2 – parný bubon, 3 – stúpacie trubky, 4 – potrubie pre odvod nasýtenej pary: najvyšší bod kotlového systému, 5 – spádová trubka, 6 – vodná nádrž) [14] | 25 |
| Obr. 14 - Komponenty bubna (1 - stúpačky A2, A3; 2 – spádová trubka B1) | 26 |
| Obr. 15 - Odvod pary z parného bubna (1) | 27 |
| Obr. 16 - Prívod napájacej vody (1) | 27 |
| Obr. 17 - Odkaľovacie potrubie (1 – odkaľovacie potrubie, 2 – spádové potrubie vody) | 28 |
| Obr. 18 - Poistný (1) a kontrolný (2) ventil parného bubna na KD3 | 29 |
| Obr. 19 - Ventily (1) parného bubna na KD3 | 29 |
| Obr. 20 - 3D model parného bubna (a. – pohľad spredu, b. -pohľad zozadu) | 31 |
| Obr. 21 - Detail skutočnej geometrie prielezu H1 [21] | 33 |
| Obr. 22 - Detail polohy prielezu H1 vzhľadom na eliptické dno [21] | 33 |
| Obr. 23 - Skutočná geometria hrdiel A2, A3, B2 [21] | 34 |
| Obr. 24 - 3D model parného bubna (detail hrdiel A2, A3, B1) | 35 |
| Obr. 25 - 3D model parného bubna (skeletový pohľad) | 36 |

Zoznam použitých tabuliek

| | |
|--|----|
| Tabuľka 1 Požadovaná minimálna hrúbka steny [mm] | 32 |
| Tabuľka 2 Vonkajšia dĺžka hrdla prispievajúca k vystuženiu [mm] | 34 |
| Tabuľka 3 Vypočítaná dĺžka prispievajúca k vystuženiu pozdĺž steny plášťa [mm] | 35 |
| Tabuľka 4 Výpočet plochy zaťaženej tlakom - plocha otvoru hrdla [mm ²] | 36 |
| Tabuľka 5 Výpočet plochy zaťaženej tlakom – škrupina v pozdĺžnej / obvodovej rovine [mm ²] | 37 |
| Tabuľka 6 Pravidlá pre vystužovanie podľa ČSN EN 13445-3 (9.5.2) [4] | 38 |
| Tabuľka 7 Maximálny dovolený a maximálny skúšobný tlak podľa ČSN EN 13445 [4] [MPa] | 39 |

Zoznam použitých značiek chemických prvkov a zlúčenín

| <i>Prvok / zlúčenina</i> | <i>Názov</i> |
|--------------------------|-----------------------|
| Pt | platina |
| Rh | rhódium |
| Pd | paládium |
| NH ₃ | amoniak |
| O ₂ | molekulový kyslík |
| NO | oxid dusnatý |
| NO ₂ | oxid dusičitý |
| NO _x | všeobecný oxid dusíka |
| N ₂ O | oxid dusný |
| H ₂ O | voda |
| •NH | imidový radikál |

Zoznam príloh

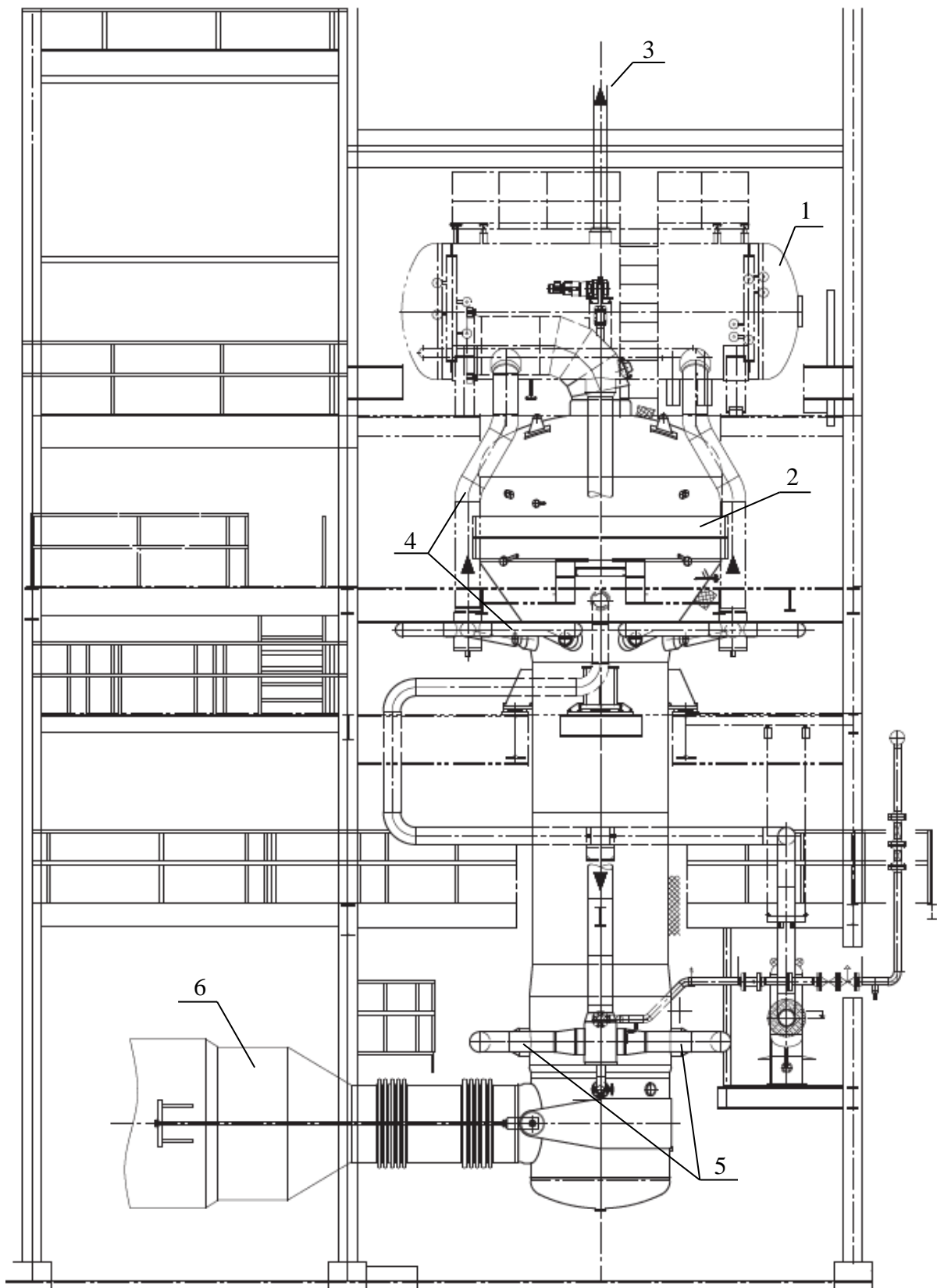
Príloha 1 – Nákres kotla na KD3 [14]

Príloha 2 – Výkres parného bubna

Príloha 3 – Pevnostný výpočet parného bubna programom VVD (CD)

Príloha 1

Nákres kotla na KD3 [14]



1 – parný bubon, 2 – spaľovacia komora, 3 – odvod saturovanej pary, 4 – stúpacie potrubie parovodnej zmesi, 5 – napojenie spádového potrubia z parného bubna na parný generátor, 6 – odvod dusíkatých spalín